

系统工程基础

顾昌耀 冯允成 刘龄德 杜端甫 等编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍系统工程的基本概念、数学规划、图论及网络分析、决策与对策、随机服务系统（排队论）等内容。全书既结构严谨，各部分又相对独立。

该书可作为管理工程、管理系统工程、技术经济、管理信息系统等专业的大学生系统工程教材，也可用作广大科技工作者和企业管理人员自学用书。

系 统 工 程 基 础

顾昌耀 冯允成 刘龄德 杜端甫 等编

责任编辑 陈子玉

*

国防工业出版社出版

（北京市海淀区紫竹院南路23号）

（邮政编码 100044）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张29³/₄ 697千字

1990年9月第一版 1990年9月第一次印刷 印数：10,001—2,000册

ISBN 7-118-00703-X/F·35 定价：5.80元

前 言

本书是在使用了五年多的内部铅印教材《系统工程基础》基础上改写成的。删去了原书中的一些数学证明和推理、以及存储模型一章的内容，增加了各部分的应用实例和第十九章离散系统仿真。将原线性规划部分的第三、四、五、六章改写为第三、四、五章，原图和网络部分的第七、八、九、十章改写为第六、七、八章。原动态规划部分的第十一、十二章合写为第九章。原非线性规划部分的第十三、十四、十五、十六章改写为第十、十一、十二章。原决策与对策部分的第十七、十八、十九、二十、二十一章改写为第十三、十四、十五、十六章。对原第二十二章马尔柯夫过程的部分内容进行了改写，现为第十七章。原第二十三章随机服务系统改写为现第十八章排队论。这样，本书由原来的二十四章变为现在的十九章。

系统工程是一门正在发展中的新兴学科，其主要理论基础是运筹学。本书的主要内容为：系统工程的基本概念及系统设计、系统分析与系统评价；线性规划；图论与网络；动态规划；非线性规划；随机决策分析；对策论；马尔可夫过程；排队论及离散系统仿真等。

《系统工程基础》可供管理工程与管理系统工程、管理信息系统等专业本科生用作专业基础教材。也可用作工程类本科生、研究生的参考教材。使用时可以根据学生及专业情况有所取舍。

参加本书编写工作的有：顾昌耀（第一、二、十三、十四、十五、十六章），邱菀华（第三、四、五章），杜端甫（第六、七、八章），杨华东（第九章），刘龄德（第十、十一、十二章），冯允成（第十七、十八、十九章）。全书由顾昌耀统稿。

本书承北京科技大学陈志诚同志审阅，并提出了许多宝贵意见，在此谨致谢意。

我们衷心感谢写本书时参阅和引用过的许多参考书的作者。

限于我们的水平，书中难免有错误和缺点，恳切希望读者批评指正。

编 者

于北京航空航天大学管理学院

目 录

第一章 系统工程的基本概念..... 1	第八章 活动网络167
§ 1.1 系统的基本概念、类型及系统 的基本特征.....1	§ 8.1 基本概念167
§ 1.2 系统工程的基本观点.....5	§ 8.2 活动网络时间参数计算174
§ 1.3 系统工程的方法与步骤.....7	§ 8.3 活动网络的时间费用优化183
§ 1.4 工程学的理论基础10	§ 8.4 活动网络的资源平衡问题189
第二章 系统设计、系统分析、系统 评价..... 12	第九章 动态规划及其应用207
§ 2.1 系统设计.....12	§ 9.1 动态规划的基本概念207
§ 2.2 系统分析17	§ 9.2 动态规划的函数方程211
§ 2.3 系统评价20	§ 9.3 动态规划的应用214
第三章 线性规划28	第十章 非线性规划的基础知识222
§ 3.1 线性规划的基本概念28	§ 10.1 非线性规划问题222
§ 3.2 线性规划的图解法30	§ 10.2 非线性规划问题的几个特性225
§ 3.3 线性规划的标准形式35	§ 10.3 凸函数和凸规划228
§ 3.4 线性规划的解和基本性质37	第十一章 一维搜索及多变量无约束 极值问题 233
§ 3.5 单纯形法49	§ 11.1 切线法233
第四章 对偶线性规划与灵敏度 分析.....63	§ 11.2 二次方法234
§ 4.1 对偶线性规划63	§ 11.3 直接法236
§ 4.2 对偶单纯形法70	§ 11.4 梯度法(最速下降法)241
§ 4.3 线性规划的灵敏度分析75	§ 11.5 二阶导数法(Newton法)244
第五章 线性规划的应用86	§ 11.6 共轭梯度法(FR法)247
§ 5.1 实用线性规划模型86	§ 11.7 变尺度法250
§ 5.2 整数线性规划97	§ 11.8 坐标轮换法254
第六章 图、网络基本概念107	§ 11.9 步长加速法(Hooke-Jeeves法)256
§ 6.1 图、网络107	§ 11.10 方向加速法(Powell法)259
§ 6.2 图的基本运算和矩阵115	第十二章 有约束条件的非线性 规划问题的解法262
§ 6.3 图的同构和连通122	§ 12.1 约束极值问题的最优性必要 条件262
§ 6.4 树125	§ 12.2 近似规划法(MAP)266
§ 6.5 欧拉圈与哈密尔顿圈135	§ 12.3 用线性逼近和一维搜索相结合 的方法求线性约束条件下非线 性目标函数的最优解269
第七章 最短路与网络流139	§ 12.4 可行方向法272
§ 7.1 最短路问题及其解法139	§ 12.5 梯度投影法277
§ 7.2 网络流问题基本定理149	§ 12.6 罚函数法(外点法)279
§ 7.3 解最大流问题的标号法155	
§ 7.4 最小费用流159	

§ 12.7 障碍函数法(内点法、碰壁法)	283	§ 16.5 矩阵对策的图解法	358
第十三章 决策分析方法概述	289	§ 16.6 矩阵对策的线性规划解法	361
§ 13.1 决策论的基本内容	289	第十七章 马尔可夫过程	365
§ 13.2 决策过程及其分类	292	§ 17.1 转移概率与转移矩阵	365
§ 13.3 收益函数——条件值与期望值	294	§ 17.2 稳态概率	370
§ 13.4 决策状态信息不确定时的决策准则	297	§ 17.3 首次到达概率	373
§ 13.5 效用值	300	§ 17.4 状态分类	375
第十四章 离散型随机决策分析	303	§ 17.5 连续时间、离散状态的随机过程	382
§ 14.1 离散型随机决策分析的一般过程	303	第十八章 排队论及其应用	387
§ 14.2 随机性盈亏平衡分析法	304	§ 18.1 排队系统的基本组成部分	387
§ 14.3 随机性条件值分析法	305	§ 18.2 生灭过程	389
§ 14.4 连续分布离散化表格程序法	312	§ 18.3 单通道排队系统	394
§ 14.5 贝叶斯决策分析法	314	§ 18.4 多通道排队系	406
§ 14.6 决策树与多阶段决策分析法	320	§ 18.5 非马尔可夫过程排队系统	416
第十五章 连续型随机决策分析	326	§ 18.6 排队系统的优化	421
§ 15.1 连续型随机决策分析模型	326	第十九章 离散系统仿真	423
§ 15.2 状态变量为正态分布的决策分析模型	330	§ 19.1 离散系统仿真的基本原理	423
§ 15.3 随机性盈亏平衡分析模型	334	§ 19.2 随机数发生器	428
第十六章 对策论	339	§ 19.3 仿真输出数据的分析	435
§ 16.1 对策问题及对策现象三要素	339	附录 1 标准正态曲线自 0 至 z 的面积	444
§ 16.2 有限零和两人对策	341	附录 2 累积二项分	445
§ 16.3 混合策略	348	附录 3 累积泊松分布 $F_p(X m)$	467
§ 16.4 矩阵对策的简易解法	354	附录 4 单位正常损失的积分 $L(z) = f_N(z) - zR_N(z)$	469
		参考文献	469

第一章 系统工程的基本概念

系统工程是以系统理论为依据,以系统为对象,寻求系统整体效果最优化的理论与方法。它也是能综合地利用多种现代科学技术的理论与方法,如数学、运筹学、概率论与数理统计学、计算机科学技术、控制论、信息论、管理学、经济学等来处理实际系统问题,且应用十分广泛的一门新兴的交叉学科。

§ 1.1 系统的基本概念、类型及系统的基本特征

一、系统的基本概念

系统是指由两个或两个以上,有着相互联系的元素(或称要素,元)组成的,具有特定功能以达到特定目的的有机综合体。或可以认为系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部份结合成具有特定功能的有机整体,而且这个系统又是它所从属的一个更大系统的组成部份。也可以把系统看成是相互关联而组合在一起的要素的集合,或称为执行特定功能,达到特定目的的相互关联的元素集合。这样就可以用数学符号表示。设 $V_1, V_2, \dots, V_n$ 为任意集合,则 $V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n$ 的任意部份集合 S ,即

$$S \subset V_1 \times V_2 \times V_3 \times \dots \times V_n$$

称为一般系统。 $V_1, V_2, \dots, V_n$ 是一般系统 S 的对象。 $V_1 \times V_2$ 称为集合 V_1 与 V_2 的笛卡儿乘积。笛卡儿乘积是 n 个集合的元素组合的集合。如 $A = \{0, 1\}$, $B = \{a, b\}$, 则笛卡儿乘积 $A \times B = \{\{0, a\}, \{0, b\}, \{1, a\}, \{1, b\}\}$,由此可见, A 与 B 的笛卡儿乘积是 A 与 B 二个集合的元素组合的集合。多个集合也可依此类推。

由系统的基本概念可以看出,构成系统的基本条件有:

(一) 系统由两个或两个以上的要素组成。这些要素可以视系统的具体情况而有不同的含义。如航空工业系统可以由飞机制造厂、发动机制造厂、仪表制造厂……等作为航空工业系统的要素,或称为子系统。如把飞机或某种机器作为一个系统,则组成飞机或机器的部件、零件是这个系统的要素。企业的计划管理系统、财务管理系统、生产管理系统、……等,则是整个企业管理系统的要素或子系统。

(二) 系统是一个有机的整体。在系统中各要素之间有着制约的有机联系,各要素之间根据规定的任务有明确分工。各要素在未组成系统时,或从系统中分离出来时,其功能与组成的系统的功能是不同的。一般地说,将各要素优化组合而成的系统,其整体功能应大于其各组成要素的各个别功能的简单的代数和。

(三) 系统必须具有明确的目的性。

(四) 系统中存在着人员、资金、物质、能量,信息的流动,但是,它们的流动都受到信息流的控制,使系统内的动态流更有序。例如,工厂出产的产品在销售过程中,一般先要集中于流通中心,再通过分配中心分配或销售到各需求单位,形成商品流动即

物质流动,以及相关的资金、能量的流动,但促使这种商品流动的原因则是信息流动。在产品分配及销售过程中,有管理与经营活动,其间必然有人的活动。

(五) 系统与其周围环境,即外界环境有着密切关系,系统与外界环境有着双向影响。即环境对系统有影响,系统对外界环境也有影响。这种影响有正负两种。既要考虑系统的正的(好的)影响,也要充分估计和评价负的(坏的)影响。在某种意义上说,对负影响的科学评价,可以事先采取预防措施,避免重大损失,具有积极意义。

以系统为对象研究问题时,需要根据构成系统的条件,从概念上或物理实体上组成一个“系统”。

二、系统分类

从不同的角度,系统可以有各种不同的分类。

(一) 自然系统与人工系统

自然系统是未经人的加工与改造自然形成的、由自然物质组成的系统,或天然就有的系统。如生命系统、生态系统、原子核结构系统等。有些虽然是社会学所研究的内容,然而却是自然形成的系统,如人口增长系统等。

人工系统是指按人们特定的要求,有目的有计划地组织或改造而成的系统。如生产系统、销售系统、交通系统、武器系统、通信系统、计算机系统、计划管理系统等。人工系统一般可以分为三类。一类是由人将零件、部件装配成工具、仪器、设备、或由它们组成的工程技术系统。另一类是由一定的制度、组织、程序等组成的管理系统和社会系统。还有一类是根据人对自然现象和社会现象的科学认识而建立的科学体系和技术体系。

实际上,大多数系统是由自然系统和人工系统结合而成的复合系统。许多系统是有人参加的人-机系统。水利系统是典型的复合系统,是在对自然规律认识的基础上,由人工的作用形成的。

人工系统及复合系统是系统工程研究的基本对象。

(二) 实体系统与虚拟系统

实体系统是由物质组成的系统,如由中央运算装置、输入输出装置和终端装置等组成的计算机系统;由计算机组成的计算机网络系统;由700多万个零部件组成的“阿波罗”登月飞船;我国古代修建的都江堰水利工程等。实体系统也称硬件系统。虚拟系统也称概念系统,是由概念、原理、准则、方法、制度、程序、步骤等非实体物质组成的系统,又称软系统或软件系统。如由订货准则、订货方法和订货制度,库存最优控制与管理所组成的库存管理系统等。实体系统与虚拟系统密切相关,虚拟系统为实体系统提供指导和服务,而实体系统是虚拟系统赖以实现的物质基础。

(三) 闭环系统与开环系统

从系统的构成和形态上,可将系统分成闭环系统和开环系统,这主要是从系统与外界环境的关系来说的。当某一系统与外界环境无关时,称此系统是闭环系统。而当系统与外界环境有着信息流、物质流等相互交换,或相互影响时,此系统为开环系统,如工厂就是一个开环系统,它必须与外界环境,如市场、相关产业部门等进行材料、能量、资金、人员和信息等的交流,否则工厂的生产不能进行下去。闭环系统则无任何形式的

物质、能量、人员和信息的输入或输出。有时，为了分析方便起见，我们可以将一个开环系统分成两部份，一部份是系统本身，另一部份是外界环境，这两部份可以看成是两个闭环系统，它们之间有着物质、能量、资金、人员和信息之间的交流（输入和输出）。

（四）静态系统和动态系统

静态系统是系统的状态参数不随时间改变的系統；反之，就是动态系统。也就是说，系统的特征是由其状态变量随时间变化的信息来描述的。在实际工作中，常常研究的是系统的动态特征。为简化分析，将动态系统转化为静态系统。

（五）确定性与非确定性系统

确定性系统其行为是预先确定的，组成系统的要素之间的相互作用也是确定的，只要已知前一个状态及信息处理程序，则在确定了系统结构之后，就可以确切地预知下一个状态；变换是单值的即与系统的每一个原始状态相对应的只有一个最后状态。确定性系统有简单系统（如自动车床）和复杂系统（由自动车床及其他机器组成的生产线或生产工厂）。

非确定性系统是指系统受随机性因素的影响，系统的行为、系统内部要素之间的相互作用不能用确定量来描述，要用概率来描述。非确定性系统实质上是随机系统。简单的随机系统没有分支结构，不能分成等级或层次，其组成要素之间联系是简单的，但是不确定的。如产品零件的质量管理系统可以看成为简单的随机系统。复杂的随机系统有许多相互作用的要素，并有着广泛的联系。它们有时在时间上和内容上发生扰动。库存管理系统，生产管理系统就是一个复杂的随机系统。在实际工作中，为便于研究，将非确定性系统简化为确定性系统。

系统还可以分为对象系统（如操作系统、管理系统等），目的系统、控制系统、因果系统等。但是具体的系统常常是上述各类系统的综合。

三、系统的基本特征

（一）系统的目的性 凡是人工系统或复合系统都具有目的性，有应达到的系统目标。系统的目标是根据系统目的性具体化的数量化的指标。当然有些目标很难数量化，这时可以定性地规定或用某种间接的数量指标来表示。系统的目标可以是一个，也可以是多个，或由一组目标体系组成。系统的目的和目标既是建立和分析系统的出发点，也是评价系统的依据。

（二）系统的层次性 系统是要素的集合，系统的内部结构常常表现为一种层次结构，或多级递阶结构。一个系统可以包括许多子系统，这些子系统又可以划分为更小的分子系统。这些分子系统又可以进一步细化。系统内部的各子系统，分子系统……等之间有着层次的或等级的关系。

（三）系统的相关性 系统内部各子系统或各要素之间的相互关系是一种相互作用、相互制约的关系。这些关系有时表现得非常复杂，如反馈、因果、顺序、线性或非线性等关系。系统内部各要素之间还有相互消长、冲突或对整个系统起着破坏性的影响关系。

（四）系统的整体性 系统是两个或两个以上不同的要素所组成的整体。系统的整

体性表现为其整体功能不是由系统内各要素的简单的叠加，或简单的凑合而成，而是根据系统内部的结构、要素之间相互关系的规律性，从系统目的性出发，将系统内各要素进行优化组合，充分发挥其组合优势，以寻求系统新的有效的整体功能。这种整体功能应大于各个组成要素的功能的总和。

(五) 系统的适应性 系统有适应外界环境的特殊功能。外界环境对系统作用表现为对系统的输入，系统对输入的各种物质流、能量流、人力流、能源及信息流进行转换为输出。这就是系统的转换功能。

“阿波罗”登月计划就是具有上述特征的一个复杂系统。

图1.1是美国在1963年制定空间研究的长远规划时采用的系统分解的“关系树”法。它把美国空间研究的长远规划这样一个庞大的计划系统逐级解剖，一直分解成详细的小课题。这种方法可以将系统内部结构分解并画成树状，所以叫做“关系树”法。

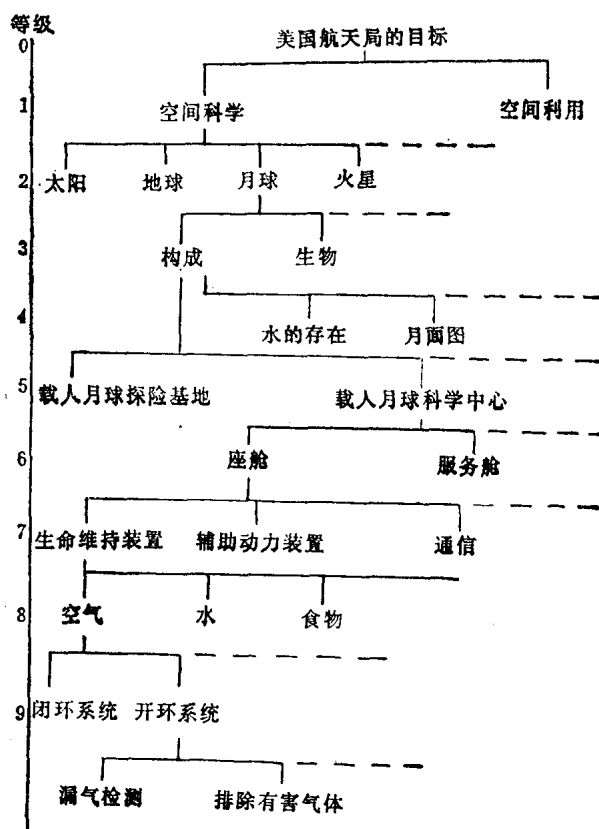


图1.1 “阿波罗”计划的系统结构

从图1.1中可以看出航天局的总目标（0级）是空间开发。这一总目标分二方面，即空间科学和空间利用（1级）。空间科学的内容有研究太阳、火星、地球、月球、彗星等，空间利用包括研究如何实际利用空间的真空环境和引力环境等，此为第2级。第3级是将第2级按有关领域划分，例如有关月球的研究包括大气、电离层、生物学、辐射带、测地学等；有关真空环境的利用方面，则包括在真空下的生物学、运输、生产制造等方面的研究以及其他方面的科学研究等。第4级表示工作内容，例如月球的构成方面包

括绘制月面图、研究月球的表面性质等。第5级表示具体的任务,例如发射载人的月球科学研究中心,载人月球探险基地。第6级是构成这个任务的各个分系统,像阿波罗计划的运载火箭、登月舱、服务舱、地面控制系统等。第7级是更小的分系统,如飞船上保证宇航员正常生活的生命维持装置、宇航员用的通讯装置等。第8级是分系统进一步划分成各个功能部分,如维持宇航员生活的空气、饮食、居住、环境、温度、湿度等装置。第9级是实现第8级中各部分的可能方案。第10级将这些方案具体化为一项一项的技术课题。然后,对每项课题的作用和地位进行客观的、科学的评价,如此由上而下地确定各级在实现总目标上的贡献。由此例可以清楚地了解一个复杂系统的内在联系。当然图1.1只是整个阿波罗计划的系统结构的一小部分。

§ 1.2 系统工程的基本观点

系统工程是一门实现系统最优化的科学,是组织管理的科学方法。它是以系统为对象,从系统全局观点出发,利用运筹学,现代数学方法、管理科学、控制论以及计算机科学等现代科学理论与方法去解决系统问题,并使其效果达到最优的理论与方法。

系统工程虽然得到广泛应用,也逐渐形成了一定的理论体系,但它还处于发展阶段。

我国著名科学家钱学森在1978年写的《组织管理的技术——系统工程》中指出:“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。……系统工程学则是组织管理这种系统的规划、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”。

运用系统工程的原理与方法分析和解决系统开发、设计、管理等问题时,应具有以下一些基本观点。

一、系统观点

即统观全局的观点,也称系统思考。其主要内容是从系统的整体效果出发来分析,考察与解决问题。就是要把系统内部各元素或系统之间,以及与外界环境之间看成是相互联系相互制约的,并使整个系统的总效果达到最优程度。

系统思考要求:(1)对系统中各组成元素间或子系统间的复杂关系进行观察和测定,进而明确系统的结构;(2)发现各构成元素间或各子系统的性质、构造与系统整体性质间的固有关系;(3)为了确定系统中各元素或子系统对整个系统的作用和影响程度,需要根据共同的目的和评价标准,对各元素和子系统进行评价;(4)根据各元素和子系统的重要程度,有效地分配资源,以提高系统的总效果。

二、相关与制约的观点

系统的各元素和子系统之间是相互联系、相互制约的。如系统的输出与输入之间,系统各组成部分的参数与系统功能之间都是互为因果的。系统工程要求用定量方法来描

述这种内部的联系。

如果把工厂看作一个系统，它由六个要素组成，这六个要素是：人、物资（能源、原料、半成品和成品等）、设备、资金、任务指标与信息等，在工厂这个系统中，各子系统之间的相互制约和联系就是通过这六个要素的流动而体现出来的。

但是六要素之间的制约和联系，必须在企业经营管理的指导下，使系统得以最优运行。例如，在一定约束条件下，用数学规划方法来描述和处理资源分配问题，以确定最优的生产计划。

三、模型模拟的观点

运用系统工程方法建立系统时，要依据系统可以模型化和模型可以模拟的观点进行处理。

模拟，或称仿真，就是将系统建模以后，在计算机上构成与实际系统具有同样性质的模拟系统，并且根据此模拟系统的计算和运行，来了解实际系统的结构与性能。其目的是：在系统研制之前用于规划、评价和研究；在系统研制中用于设计和精密分析；在系统研制成功之后用于考核设计和训练操作人员。

模型是对于对象过程的某一方面本质属性的表述，也可以说模型是将原系统经过简化以后的系统。一个理想的模型应能反映系统所代表的重要特性，同时它在数学上或物理分析上、模拟上，又应是易于处理的。

建立模型的顺序大致是：（1）明确目标和问题；（2）选定构成系统的要素和变量（包括外生变量，状态变量和内在变量）；（3）建立粗略模型；（4）将粗略模型子系统化；（5）建立子系统模型；（6）综合子系统进行模型化；（7）建立全系统的精确模型。

由于系统的目标不同，所建立的模型也有所不同。有求解最优参数的模型（如系统的最优设计），有分析系统行为的模型（用于研究生产过程运行情况），也有检定系统未来状态的模型（如市场预测模型）等。

四、系统优化的观点

在解决系统工程问题时，要求寻找或选择一个最优的系统方案，以便对系统进行最优设计、最优控制和最优管理与使用等。系统的最优方案是在一定制约条件下，使系统的整体功能达到最优程度，即系统达到预定目标的程度。系统的目标可以是单一的，如资金、周期、技术指标等。对于多目标系统，往往要求功能、资金、时间、可靠性等同时达到目标。当目标较多而又相互矛盾时，往往需要在一定准则下找出一个合理的折衷方案。近年来有人提出用“满意性”准则来代替“最优化”准则，即只要使系统达到一定程度的合理要求，而不一定寻求最优的结果。当某些系统涉及较多人为因素的影响时，往往要考虑未来采用系统的决策者和受系统影响的人的“情意”，即所谓“情意性”准则。例如有的工程项目尽管设计得性能良好，但不能得到决策人员的赏识，或由于某些原因不为群众所欢迎，那就是违反“情意性”准则的。

§ 1.3 系统工程的方法与步骤

在系统工程的实践中，积累了丰富的经验，形成了一套科学工作方法和步骤。但由于系统工程所研究的系统多种多样，情况复杂，因而不可能有一种在任何情况下都能套用的不变的程式。只能是一种处理问题的一般步骤与方法，是一种思考过程。目前，影响较大，具有一定代表性的方法是美国贝尔电话研究中心霍尔在1969年提出的三维结构。如图1.2所示。它概括了系统工程的工作步骤和阶段，以及它所涉及的各种专业知识。它为了解决规模较大、结构复杂、涉及因素众多的系统，提供了一个统一的思考方法。

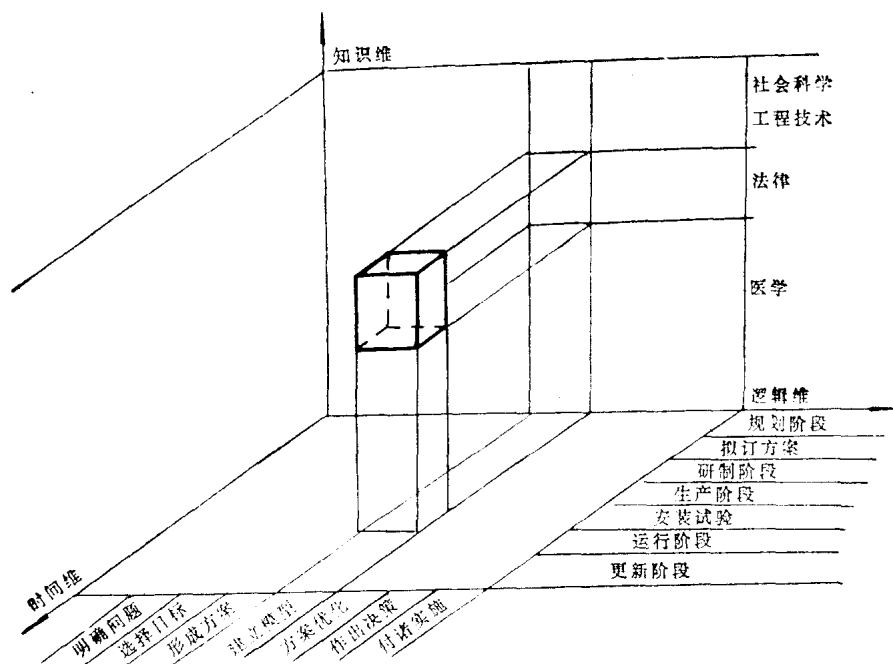


图1.2 霍尔三维结构

三维结构中的时间维，表示系统工程工作的各个阶段。一般分为：(1) 规划阶段；(2) 拟定方案阶段；(3) 研制阶段；(4) 生产阶段；(5) 安装试验阶段；(6) 运行阶段；(7) 更新阶段。在研制新型导弹或飞机等大系统时，一般都要经历以上类似的阶段。

三维结构中的逻辑维，亦称思考过程，是指实施系统工程的每一工作阶段所要经历的步骤。它也是运用系统工程方法进行思考、分析和处理系统问题时应遵循的一般程序。即(1) 明确问题，弄清实质；(2) 选择目标，确定评价指标；(3) 形成方案，进行系统综合；(4) 建立模型，做好系统分析；(5) 方案优化，即系统选择；(6) 作出决策，即系统开发；(7) 付诸实施。

把思维过程和工作阶段归纳在一起，可列出如表1.1的形式。即由时间维与逻辑维组成的二维结构，称为系统工程的活动矩阵。表1.1中 A_{21} 表示在拟订方案阶段明确问题， A_{36} 表示研制阶段作出决策等等。

表1.1 系统工程活动矩阵

时间维 (阶段)	逻辑维 (步骤)	1	2	3	4	5	6	7
		明确问题	选择目标	形成方案	建立模型	方案优化	作出决策	付诸实施
1	规划阶段	A_{11}	A_{12}	...	...	...	...	A_{17}
2	拟订方案	A_{12}	A_{22}	...	...	...	...	...
3	研制阶段						A_{36}	⋮
4	生产阶段							⋮
5	安装试验							⋮
6	进行阶段							⋮
7	更新阶段	A_{71}	...	...	...	...	...	⋮

三维结构中的知识维，是指为完成上述各阶段，各步骤的工作所需要的各种专业知识和技术素养。霍尔把这些知识分成工程、医学、建筑、商业、法律、管理、社会科学和艺术等。钱学森同志认为，“系统工程的理论基础，除了共同性的基础之外，每门系统工程又有其各自的专业基础。这是因为对象不同，当然要掌握不同对象本身的规律，例如工程系统工程要靠工程设计，军事系统工程要靠军事科学等等”。并列出了各门系统工程应有的学科基础，如表1.2所示。

表1.2 各门系统工程学科基础

系统工程的专业	专业的特有学科基础	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	教育系统工程	教育学
科研系统工程	科学学	社会(系统)工程	社会学、未来学
企业系统工程	生产力经济学	计量系统工程	计量学
信息系统工程	信息学、情报学	标准系统工程	标准学
军事系统工程	军事科学	农业系统工程	农事学
经济系统工程	政治经济学	行政系统工程	行政学
环境系统工程	环境科学	法制系统工程	法学

从表1.2中可以看出各种系统工程横跨了自然科学，数学，社会科学，技术科学和工程技术。发展系统工程需要各方面的科学技术工作者的通盘合作和大力协同。在用系统工程解决问题时，非常强调组成综合学科小组，由各种学科的专家，有经验的工人和领导参加，共同讨论研究并解决问题。

将时间维，逻辑维和知识维结合起来便形成一个三维矩阵，其中每一个单元可标以 A_{111} , A_{123} ……等标号，分别表示时间，逻辑和知识方面的要求。从活动矩阵可以看出，其中各项活动是相互影响，紧密联系的，为使系统在整体上取得最优效果，应把各阶段、各步骤的活动反复地进行。

下面简述阿波罗计划的组织管理过程，以说明系统工程的方法和步骤。其实施过程如下：

一、建立管理组织机构，明确职责分工

在宇航局设立阿波罗计划办公室来主管全部工作，并在所属机构中建立项目办公室来分管各种研究项目。各办公室的主要职能是：（1）项目的计划与控制；（2）系统工程；（3）可靠性及质量保证；（4）试验；（5）操作实施。并分别设立主管部门。

整个管理过程分成5个方面：（1）确定计划的基本要求；（2）量测性能；（3）分析与评价；（4）控制与指导变化；（5）动作与反馈。各职能部门经常协调和处理的问题是工程进度、成本费用和技术性能。

二、制订和选择方案

计划办公室的首要任务是为阿波罗登月计划选择飞行方案。他们根据技术部门的建议，曾归纳为三种备选方案：（1）直接使用新的运载火箭；（2）地球轨道交会；（3）使用土星运载火箭，一次发射载人航天飞行器和登月舱。对三种方案从技术因素、工程进展、成本费用及研制难易程度等方面进行综合分析，权衡利弊之后，认为第三方案可比前两个方案提前几个月完成，而且研制费用比前两个方案低10%，并能实现阿波罗计划的全部目标，从而成为当选的最终方案。

三、组织管理过程

方案确定之后，即进入管理过程。管理过程的第一方面是确定计划，阿波罗计划采用了“工作细分结构”的系统分析法，把整个系统由上而下逐级分成项目、系统、分系统、任务、分任务等各个层次，以便确定计划的分支细目及其相互关系，明确责任，并为绘制PERT网络图和编制预算提供基础。使整个计划的进度、财务及技术三方面的要求连成一个整体。

管理过程的第二方面是性能量测。为了及时了解各职能部门的质量和进展情况的信息建立了“管理信息与控制系统”及一系列“设计审查及产品检查”制度。各种性能的信息经过整理和分析后逐月上报计划负责人，以便集中精力抓住薄弱环节。同时按制度规定进行初步设计审查，关键设计审查，产品结构审查，飞行合格鉴定，飞行准备审查等。

管理过程的第三个方面是分析评价。主要工作是对性能数据进行评价，并确定必须及时采取的行动，以保持各个工作领域相互平衡和决定完成主要目标。与此同时，还要分析工作进度和成本费用之间的关系，绘制费用增长曲线，以估计完成计划所需的总费用，确定在哪些薄弱环节上所支出的费用未能产生预期的工作量。

管理过程的第四个方面是控制及指导。由于研制过程中不可避免的变化，因此必须有系统地进行控制和调整，以保证全部计划的实现。凡是影响最终产品的形式、装备、功能的任何变动，都必须由规定的决策机构批准。为了控制成本，要定期审核该计划各部分的实际成本，发现超支动向，以便及时调整。阿波罗计划的财务开支始终保持相对稳定，平均每年实际成本与计划成本的差距不到1%。

管理过程的最后一个方面是保证整个管理机构在日常活动中履行各种指令、规范、

程序、使各级机构的负责人明确自己的职责范围,经常召开“计划审查会”,促进管理“活动”的执行,有选择地安排议事日程,及时对重大问题作出决策等。

总之,阿波罗计划是依靠执行过程中从整个系统出发并面向整个系统的综合管理方式,运用了系统工程的方法和步骤,从而取得了成功。

§ 1.4 系统工程的理论基础

系统工程是一大工程技术门类,其中包括工程系统工程、军事系统工程、企业系统工程、信息系统工程、环境系统工程、教育系统工程、计量系统工程、标准系统工程、农业系统工程、社会系统工程等。各门专业系统工程各有其特有的学科基础,但共同的理论基础有运筹学、现代数学、计算机科学、控制论及大系统理论、管理科学及经济科学等。

从目前发展情况来看,系统工程的主要理论基础是运筹学。它既是一门理论科学,又是一门应用科学,其主要分支有:

(一) 规划论是运筹学的一个主要分支。主要研究在满足既定的要求下,按某一或某些衡量指标来寻求最优方案的问题。如果目标函数和描述约束条件的数学方程式都是线性的,则称为“线性规划”,否则称为“非线性规划”。如果所考虑的规划问题与时间或决策阶段有关,则称为“动态规划”问题。

(二) 排队论是一种用来研究公用服务系统工作过程的数学理论和方法。在这个系统中,服务对象的到达过程和服务过程都是随机性的,是一种随机聚散过程。它通过对每个个别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,从而提高服务系统的工作能力和工作效率。

(三) 决策论是运筹学最新发展的一个分支。广泛应用于经营管理工作中。它根据系统的状态信息,可能选取的策略以及采取这些策略对系统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组最优策略。

(四) 图论及网络分析是从构成“图”的基本要素出发,研究有向图或无向图在结构上的基本特征,并对由“图论”要素组成的网络,进行优化计算,以确定其最短路、最大流等。同时结合工程和管理问题进行实际应用。

网络计划法又称计划评审技术(PERT),是一种新的科学管理方法。它以数理统计为基础,运用网络分析的方法,将构成计划目标的所有任务,按其相互之间的逻辑关系和时间参数组成统一的网络形式,通过计算确定其进度和关键路线,并通过网络进行资源和费用的优化。

(五) 对策论,也称博弈论。它是一种研究对抗性竞争局势的数学模型,寻求最优的对抗策略。在这种竞争局势中,各方具有相互矛盾的利益。若仅有两方参与,则称为两人对策。若一人所得即为对方之所失,则称为二人零和对策。二人零和对策与线性规划有密切关系。对策论在军事上应用较多,现在应用范围也日趋广泛。

(六) 库存论研究是指经营管理工作中保证系统有效运转的物资储备量,即系统需要在什么时间,以什么数量和供应来源补充这些储备,使得保持库存和补充采购的总费用最小。

(七) 计算机仿真技术是系统工程中近年来发展起来的一种极为重要的方法。人们为了深入研究系统的变化规律,并据此探求解决实际问题的可能途径,在建立系统的模型之后,一般需要在人为控制条件下通过改变特定的参数选择来观察模型的响应,预测系统在真实环境条件下的品质与行为,这个过程称为仿真。系统工程中应用的仿真主要是计算机仿真技术,由于以各种实际系统的运行状态为研究内容,故又称系统仿真技术。有连续系统仿真与离散系统仿真技术,这些都是应用广泛而实用的系统分析方法。

此外,还有多目标规划,随机规划,组合优化,马尔柯夫过程,搜索论等。本书将着重阐述以下几方面内容:线性规划,非线性规划,动态规划,图论及网络分析,网络计划方法,决策分析与对策论,排队论,马尔柯夫过程及离散系统仿真等,以及系统工程的基本内容概述。

第二章 系统设计、系统分析、系统评价

系统建立过程包括系统规划、系统设计、系统制造与运行三个阶段。

系统规划的主要任务是构思或构造系统，即定义系统，明确建立系统的必要性，并据此确定系统的目标。同时，要提出系统必需的环境及其他约束条件。这一阶段的成果以系统开发的计划任务书形式反映出来。在计划任务书中除了必须具备上述内容外，还要确定系统建成的期限、系统的投资额等。

系统设计阶段的工作包含概要设计、系统分析、确定系统设计方案及进行详细设计。概要设计的主要内容是确立各种可行方案。系统分析是根据概要设计进行目标分析、可行方案分析、费用与效果分析等。在系统分析的基础上确定系统设计方案并进行详细设计。

第三阶段是系统制造和运行阶段。首先是对系统中的关键项目进行试验和必要的修改，以求设计方案建立在可靠的基础上。在完成工艺设计之后开始制造、安装和调试工作，并在运行的基础上研究系统的调整和改进工作。

系统设计、系统分析和系统评价是建立系统的基本内容。

§ 2.1 系统设计

系统设计是按照预期的目标和运行环境来设计和确定合理的系统，使其适应人们的要求。为此，系统设计时应考虑各子系统或要素之间及它们与整个系统的关系，把局部设计进行综合分析，进而从整体出发解决系统最优化问题。

一、系统设计的内容

系统设计可分为两个部分：即概要设计与详细设计。概要设计或功能设计，包括方案选择和可行性研究。详细设计又称程序设计，包括系统外部设计和制造设计。

按照系统设计的进程，设计工作可分为4个阶段：

(一) 方案选择 根据目标要求提出几种可行方案，进行比较分析，并从中选择最优方案或满意方案。这是系统的基本设计阶段。它可分为概念设计及预备性设计二个步骤，前者主要是形成系统的轮廓，后者则应作出较具体的初步方案，以便进行方案比较与评价。

(二) 可行性研究 对已选出的系统方案实现的可能性进行必要的分析，如所选方案是否超出原来所根据的资源约束条件，即时间、经费、人力、能源等。

(三) 系统外部设计 对构成整个系统的各分系统，基本要素所需要的外部条件，提出具体的设计要求（功能、性能、联接条件等）。把系统的总指标分配到各个分系统和基本要素上去。这一阶段要充分利用系统分析的成果，要清楚地了解各基本要素对分系统的影响以及各分系统对整个系统的影响。