

系统工程基础

沈泰昌 谷宝贵 谢秉兰 编著

国防工业出版社

系统工程基础

沈泰昌 谷宝贵 谢秉兰 编著

GF132/32

国防工业出版社

内 容 简 介

本书内容包括系统的概念、系统的数学方法、系统分析、网络技术、可靠性、环境对人-机系统的影响、预测技术和决策技术。

本书可作为高等工业学校“系统工程”和管理工程课程的教学参考书，也可作为培训企业技术管理干部的教材。

系统工程基础

沈泰昌 谷宝贵 谢秉兰 编著

*

国防工业出版社 出版

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

*

787×1092¹/₁₆ 印张 12⁵/₈ 289 千字

1981年1月第一版 1981年1月第一次印刷 印数：0,001—8,200册

统一书号：15034·2125 定价：1.35元

前 言

系统工程是当代正在发展和完善的一门工程技术。它以系统为对象，把要研究和管理的事与物用概率、统计、运筹、模拟等方法经分析、推理、判断建成某种系统模型，进而采用最优化的方法求得系统的最佳化结果。即经过工程过程使系统的各组成部分相互协调，相互配合，以获得技术上先进，经济上合算，运行中可靠，时间上最省。

由于系统工程这门技术涉及的范围广泛，且目前正处在发展和完善之中，有关的专著又很少。为满足当前教学和有关方面的需要，我们参阅了国内外有关书籍、资料并根据我们教学实践，在时间比较仓促的情况下编写了这本书。鉴于我们的水平有限，所以在材料的选取，对问题的阐述等方面都还远远不能把全部情况反映出来。书中一定会存在不少缺点和错误，希望读者批评指正。

在编写本书时，参考了较多的文献资料，在此谨对各有关作者及编者深表谢意。

目 录

第一章 系统工程的概念 1	2. 多因素法48
§ 1 引言 1	§ 6 统计数量化方法53
§ 2 系统的概念 2	1. 打分加点法55
1. 系统的定义 2	2. 两两比较法55
2. 系统的特征 3	3. 待定系数法57
3. 系统的分类 3	4. 工作抽样法60
§ 3 系统工程的概念 4	第三章 系统分析63
1. 系统工程的定义 4	§ 1 系统分析的基本概念63
2. 系统工程的形成和发展 5	§ 2 系统分析的准则与指标体系64
3. 系统工程适用的范围 5	1. 系统分析的准则64
§ 4 系统工程的理论基础 6	2. 系统分析的指标体系65
§ 5 传统方法与系统工程的区别 6	§ 3 系统分析的步骤66
1. 三维结构分析 7	1. 目标的确定66
2. 系统工程的一般步骤 7	2. 收集资料, 确定因素及其影响范围68
3. 软科学性 7	3. 建立可能模型68
第二章 系统工程的数学方法 9	4. 分析对比各方案的数量指标和 质量指标68
§ 1 系统模型及其形式 9	5. 综合分析确定最佳方案69
§ 2 系统模型的构造方法11	§ 4 企业系统分析的方法69
1. 直接分析法11	1. 成本效益分析69
2. 最小能量分析法18	2. 投资效果分析74
3. 概率统计分析法20	3. 盈亏转折分析75
4. 工程设计分析法21	4. 存贮控制分析76
5. 状态空间分析法23	5. 质量管理分析81
6. 模拟分析法27	6. 设备更新分析87
§ 3 目标函数与约束条件28	7. 资源利用分析91
1. 目标函数与约束条件28	8. 不确定性分析104
2. 目标函数的最速上升方向和最速 下降方向29	§ 5 决策105
3. 函数的凸性32	1. 决策模型105
4. 凸规划法与非凸规划法35	2. 决策种类106
§ 4 解析最优化方法35	3. 培欣决策108
1. 微分法35	第四章 网络分析技术113
2. 牛顿法37	§ 1 概述113
3. 最小二乘法38	§ 2 网络图的基础知识113
4. 共轭斜量法42	1. 网络图的组成113
§ 5 直接优化法45	2. 编绘网络图的规则114
1. 单因素法45	3. 网络图的画法116

§ 3 作业时间的确定	117	5. 分布函数的归纳	150
1. 一时估计法	117	§ 4 系统的结构函数	151
2. 三时估计法	117	1. 串联系统	151
3. 关于平均时间 $t_m(i, j)$ 的依据	117	2. 并联系统	151
4. 用资料求平均值法	120	3. n 中之 K 系统	152
§ 4 PERT 的参数与计算	120	§ 5 系统的可靠性	152
1. 结点的时间参数与计算	120	1. 串联系统的可靠性	153
2. 作业的时间参数与计算	121	2. 并联系统的可靠性	153
3. 关键路线	122	3. n 中之 K 系统的可靠性	153
§ 5 网络图参数计算的方法	123	§ 6 网络系统可靠性的计算	154
1. 图上算法	123	1. 最小径算法	154
2. 表格法	124	2. 最小割算法	155
3. 矩阵法	126	§ 7 模拟法-蒙特卡罗法	156
§ 6 任务按期完成的概率分析与 计算	128	1. 模拟法的来源	156
1. 整个完成时间适合正态分布律	128	2. 随机数的产生	157
2. 概率计算	129	3. 计算机模拟	158
§ 7 CPM 的分析与计算	130	§ 8 估算系统可靠性的限界法	158
1. 直接成本与时间的关系	131	§ 9 以失效时间为依据的可靠 性边界	159
2. 经济赶工的方法	131	1. 增失效率与减失效率	159
3. 考虑间接成本的 CPM 方法	134	2. 增失效率分布的可靠性边界	160
4. 限制关键路线法	134	3. 增失效率平均数	161
§ 8 网络技术的应用	134	第六章 环境因素对人-机系统的影响	162
1. 用于时间的计划管理	134	§ 1 人的疲劳	163
2. 用于成本的计划管理	135	§ 2 温度、湿度对人工作的影响	164
3. 用于资源的调配	136	§ 3 照明与工作的关系	165
4. 用于生产调度	137	§ 4 色彩调节	165
第五章 系统的可靠性	138	§ 5 噪音及音乐调节	168
§ 1 引言	138	§ 6 污染	169
1. 可靠性的定义	138	第七章 系统预测技术	171
2. 可靠性的度量指标	138	§ 1 系统预测技术的概况	171
3. 可靠性的重要性	140	1. 预测的定义	171
4. 可靠性包括的工作范围	140	2. 预测技术的分类	171
5. 失效规律	141	3. 预测的基本过程和步骤	171
§ 2 逻辑图	142	4. 预测要注意的问题	171
1. 逻辑图的必要与描述	142	§ 2 定性预测方法	172
2. 典型系统的逻辑图	143	1. 专家预测法	172
§ 3 统计分布函数	145	2. 代尔菲法	172
1. 二项分布	145	3. 主观概率预测法	173
2. 普阿松分布	148	4. 相互影响矩阵法	173
3. 正态分布	149	§ 3 定量预测方法	173
4. 威布尔分布	150	1. 简单平均法	173

2. 一次移动平均法	174
3. 二次移动平均法	174
4. 一次指数平滑法	177
5. 二次指数平滑法	179
6. 三次指数平滑法	179
7. 一元线性回归法	180
8. 最小平方方法	182
9. 二元线性回归法	183
10. 非线性回归法	184

§ 4 概率预测方法184

1. 马尔可夫理论的基本概念184
2. 概率向量及概率矩阵185
3. 状态转移矩阵188
4. 应用举例190

§ 5 预测技术在企业生产中的应用 ...192

1. 企业系统预测的重要性192
2. 生产需要预测方法的应用192

第一章 系统工程的概念

§ 1 引 言

从本世纪四十年代开始,在美国产生了一门新的科学技术——系统工程。经过二十几年的形成和发展,于六十年代在征服宇宙空间的实践中确立了自己的体系。尽管目前它仍处在发展和逐步完善之中,但却广泛地引起各国的重视与应用。

现在美、苏、英、日等国政府部门都设有专门机构从事这项工作,一些大的企业,厂家也都设立系统工程研究机构,他们为政府、企业、厂家制定各种可供选择使用的方案,并协助实施所选择的方案,因此,人们常称他们是有关决策部门的智囊团。

美国从1964年起每年都举行系统工程年会,出版专刊,1965年出版了《系统工程手册》,它包括系统工程的方法论,系统环境,系统元件,系统理论,系统技术,系统数学等。

在英国,1965年,兰开斯特大学第一个成立工程系。

六十年代末,日本深感缺乏系统工程人材所造成的困难,从而大量由美国引进了这方面的技术与资料。七十年代初期出版了“系统工学讲座”丛书,到1975年已培养出系统工程师十一万人。

我国从1962年在钱学森等同志倡导与支持下,开展了对尖端技术科学管理的系统工程方法的探讨,1964年华罗庚教授提出了统筹法和优选法。他们都进行了试点,取得了良好成果。尤其近些年来,为加速实现我国的四个现代化,促进社会变革,系统工程这门技术已普遍地得到了国内各行各业的重视。初步实践证明:领导机关采用系统工程,提高了组织和管理水平;企业部门采用了系统工程,改革了传统的管理方法,提高了质量,提高了生产率;军事上采用了系统工程,降低了预算,缩短了运转周期;科技界采用了系统工程,使老学科焕发了青春,新成果获得了最优化;高等学校设立了系统工程专业,为整个社会的变革培养出组织和管理干部。

我们知道,要建立一个现代化的国家,不发展科学技术是不行的,要发展科学技术非要投入巨大的人力、物力、财力进行持久不懈的努力才能达到目的。因此,要保证科研任务的顺利完成,必须在组织管理上有一套科学的方法和措施。只有这样才能缩短从理论到应用的时间,加速现代化的步伐。请看一个小统计:

名 称	照 相 术	电 话	无 线 电	电 视	雷 达	原 子 弹	半 导 体
年 代	1727~1829	1820~1879	1867~1902	1922~1936	1926~1940	1939~1945	1948~1953
历 时	102年	59年	35年	14年	14年	6年	5年

显见,居于十八世纪的科学和管理水平时代,像照相术从1727年开始科学研究,经过

了102年才达到实用阶段；到了十九世纪，科学发展了，管理水平提高了，像电话从1820年开始研究到1879年就研制成功了，历时用59年。但它真正大量使用是到了十九世纪末期才推广开来；二十世纪前半期科学发展到了一个水平，文明生产加强了，一项科研成果从基础理论研究到实际应用所需的时间就短多了。例如英国搞的雷达由于采用了运筹学只用了14年；美国搞的“曼哈顿计划”——原子弹，只用了6年；半导体的成功只用5年了。因此，第二次世界大战以后，人们总结美国科学技术的飞跃发展经验时，只有两条，那就是科学技术研究成果的扩大应用和科学组织管理工作经验的成熟。同样，战后日本之所以能使经济发展跃入前茅就在于他们总在研究提高生产率的关键技术和实现这种技术的组织管理方法。一句话，经济发达国家重要的一条经验就是他们在用系统工程这门技术抓科学、抓技术、抓生产。

§2 系统的概念

1. 系统的定义

说起系统（System）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”。当今我们定义为：“系统（System）是由两个以上相互区别和相互作用的单元间有机地结合起来完成某一功能的综合体，每一单元也可以称为一个子系统。而且它又是另一个更大系统的组成部分”。因此，一个机组，一个工厂，一个部门，一项计划，一个研究项目，一种组织，一套制度都可以看成一个系统。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，一般由人与装备分别或联合担任。输入、处理、输出是系统的三个要素。如果输入原料，经过加工或作业得到产品的输出，这种系统称为生产系统。

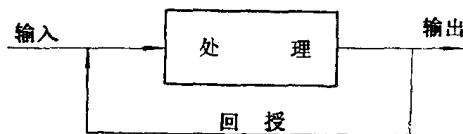


图 1-2-1

一项计划也可视为输入，经过执行这就是处理，得到结果即是输出，属于管理系统……。执行后的成果不一定是理想的，此时可以利用考核，校验修正计划，加强执行，这在系统上称为回授（或反馈）。这些，我们可以用图 1-2-1 所示的框图来概括。

可是，如果就事物本身存在来论，就没有单独地把它作为系统来研究的必要。只有当我们不仅仅是要认识它的存在，而且还要考虑为达到与此同样的目的，有没有更好的办法以便着意去改变它时，就出现了系统的意义。正如钱学森同志指出的：局部与全部的辩证统一，事物内部矛盾的发展与演变，本来是辩证唯物主义的常理，而这正是“系统”概念的精髓。不过，以前在科学技术中不注意系统概念的运用罢了。恩格斯早在 1886 年初就讲过：“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”。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”这里，恩格斯讲的集合体就是我们讲的系统，恩格斯强调的过程，就是我们讲的系统中各个组成部分的相互作用和整体的发展变化。

同样马克思、列宁、毛主席，在他们的著作中也有许多这方面的论述。我们搞系统工程的一定要熟悉这些论述，作为强大的理论武器。我们要认识到系统这一概念来源于人类的长期社会实践，首先在马克思主义的经典著作中总结上升为明确的概念。现代科学技术对系统的贡献在于把它的运用具体化。这就是说，不能光说系统，要有具体分析一个系统的方法，要有一套逻辑推理，数学运算，要定量地处理系统内部的关系。

具体来说，系统除了是两个以上单元构成之外，还必须具备：

- (1) 有可判断目标性能好坏的通用基准；
- (2) 为完成同一目标，可有几种不同的方案；
- (3) 有用物理模型、数学模型或模拟模型来分析、验证的可能；
- (4) 系统要具有独立性。

在这四点中，最重要的是第(1)点，即须“具有判断目标性能好坏的通用基准”。由于系统的范畴、性质，完成的功能不同，这种通用基准也是不同的，例如：美国切斯纳特在他写的“系统工程方法”一书中定出判断工程系统价值的五项指标是性能、时间、费用、可靠性、适应性。

但是，对于一个系统，特别是把人看成系统的一个组成部分的人-机系统来说，除了这些判断尺度之外，对于操作人员的情绪，干劲方面的影响也是不能忽视的，在我们这本书的第二章，就提出用十项五十因素作为判断一个武器系统性能的通用标准。

2. 系统的特征

作为一个系统从其定义可以表现出它有如下五个特征：

- (1) 集合性 是指系统是由两个以上相互有区别的单元互相间有机地结合起来完成某一功能的综合体。
- (2) 相关性 是指系统内的单元是相互联系、相互作用有机的结合在一起。
- (3) 目的性 要研究的任何系统，都是为了达到某一目的，而且往往不是单一的目的。
- (4) 环境适应性 任何一个系统都存在于一定的环境之中，因此它必然地要与环境产生物质的、能量的和信息的交换，必须适应环境的变化。

(5) 整体性 是指系统中单元间的关系，要服从整体要求，单元与系统间也要服从整体要求，以整体观念来协调系统诸单元。

3. 系统的分类

前面我们谈到了系统的概念和特征，在自然界和人类社会中系统和系统性的问题是普遍存在的。概括地说，系统可分为：

(1) 自然系统与人造系统

所谓自然系统就是说它的组成单元是自然物，它的特点是自然形成的。人造系统是人为产生的系统，人造系统包括三种类型：一是由人们从加工自然物中获得系统，如工具、仪器、设备、工业工程系统；二是由一定的制度、组织、程序等所构成的管理和社会系统；

三是根据人们对自然现象和社会现象的认识而发现和建立起来的学科体系。

实际上,大多数系统是自然与人造相结合的复合系统。因为到目前为止我们所研究的系统都离不开人。

(2) 开放系统与封闭系统

大部分的系统为开放系统,也就是说它们将材料、能量或情报与其环境交换,例如一个公司或一个厂家就是一个开放系统。若无任何形式的能量(如情报、热量、实质材料)输入或输出,此系统便是封闭系统。

若将相互作用的环境分开,而后把造成能量、材料或情报相互交换的环境部分视为一个系统,则一个开放系统可分成两个封闭系统。

(3) 可适应系统和不可适应系统

能适应环境改变的系统称可适应系统,意即环境的改变或震荡所引起的反应(决策)便形成新的系统状态。例如一个公司就可视为一个适应系统,它经由时间的变迁,属性就有其不同的价值。因此,由观察属性的当期价值就可说明系统的状态。例如,通过观察利润、欠拨量、生产量等就看出一个公司的经营状态。经不起环境改变或震荡的系统称为不适应系统,这种系统在所论环境下是没有生命力的。比如,一个企业要不断了解同类型企业的动向,产业界的动向,国家和市场的要求等,并从多种经营方案中选取最优的经营决策,以便适应环境的变化,达到企业设定的目的,能够做到这一点那它就是一个适应环境的经营系统。否则就是一个不适应系统。

§ 3 系统工程的概念

1. 系统工程的定义

系统工程(System Engineering),顾名思义,就是研究系统的工程技术,它不是内容单一的技术,而是许多门工程技术的总类名称,它横跨了自然科学,社会科学。我们知道,工程技术的特点在于改造系统并取得实际成果,这里并没有说定什么系统(任何一种系统都行),它只是说改造系统,即对系统有个工程过程。当然,在改造系统这一工程过程中,总是按照要达到的目标采用最优化方法进行的,以期使目标达到最佳值。因此,系统工程这门技术,它离不开具体的环境和条件,离不开事物本来的性质和特征,避不开客观事物的复杂性,必然要同时运用数个学科的成果。也就是说,系统工程是从系统的观点出发,跨学科地考虑问题,运用工程的方法去研究和解决各种系统问题。

系统工程着眼于整体的状态和过程,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。系统工程包含着深刻的社会性,涉及到组织、策略、管理、教育等某些上层因素,因而所研究的一些基本关系往往不能简单地用数学公式来表示,而着重于概念或原则的表达,这些概念或原则再进一步为各种科学方法所确定。概括地说,系统工程是当代正在发展和完善的一门工程技术,它以系统为对象,把要研究和管理的事与物用概率、统计、运筹、模拟等方法经分析、判断、推理等程序建立起某种系统模型,进而采用最优化方法求得系统的最佳化结果,即经过工程过程使系统的各组成部分互相协调,互相配合,以获得技术上先进,经济上合算,运行中可靠,时间上最省。

系统工程在系统的筹建或更新中，有两个并行的过程，一个是工程技术过程，一个是管理控制过程，这两个过程是共同处于“处理”的全过程的。也可以用如下的流程，图 1-3-1 来表示它的概念。

2. 系统工程的形成和发展

系统工程一词起源于美国。四十年代，美国贝尔电话公司在发展通讯网络中，为缩短从科学发明到投入应用的时间，认识到不能仅研究电话机和交换台等设备，更需要研究整个系统，于是按照时间顺序，把工作划分为规划、研究、发展、工程应用及通用工程等五个阶段，首先提出了系统工程一词。

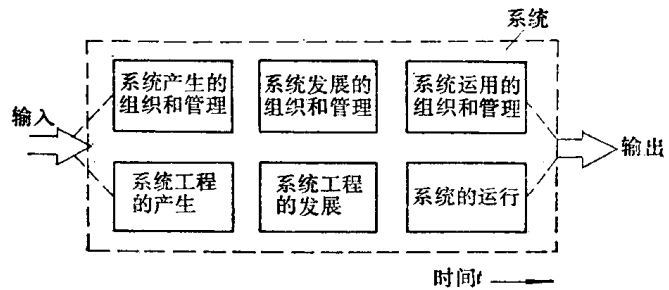


图 1-3-1

五十年代前后美国的兰德公司，采用系统分析的方法对军事作战行动进行了系统的研究，为系统工程的广泛应用奠定了基础。1957 年哥德与麦克霍尔(H. Goode 和 R. E. Machol) 两人写出了第一本以“系统工程”命名的书。1958 年 1 月美国海军在顾问公司协助下完成了“PERT”技术，即“计划评审法”，用于北极星导弹核潜艇研制计划上，使北极星导弹提前两年完成。在这期间，美国把全部军事技术发展工作建立在系统工程这一新的基础上，在国防部设置了系统分析部。麦克纳马拉任国防部长时提出“规划、计划、预算编制法，简称“PPBS”用于统一国防力量。它涉及到人员的培养、军事技术政策、武器系统的发展规划，科研工作的组织管理、生产制造、评定、运用、训练、直到某些部队的改编。

六十年代初，系统工程在科技领域、军事领域、教育领域都得到了发展。

七十年代，阿波罗登月计划成功，是系统工程的辉煌成就。这个计划从1961年到1972年，历时 11 年，参加研制的工程技术人员 42 万，2 万多家公司和工厂、大学研究机构 120 所，使用 600 多台计算机，耗资 300 多亿美元。由于采用了系统工程的方法，使计划按时完成了。它主要成功点就是在整个计划的组织管理、技术实施过程中，采用了系统分析，网络分析技术等系统工程方法。

国际上，1972 年 10 月为研究解决经济发达国家所共同面临的环境、生态、城市、能源等问题成立了国际应用系统分析研究所；近年来不断召开系统工程学术会，各方面论文、实验报告也是层出不穷，硕果累累。

3. 系统工程适用的范围

系统工程是一门技术，它必定有一套方法，正是以这套方法去处理系统问题而具有广阔的适用范围。也就是说系统工程可以解决的问题涉及到改造自然，改造提高社会生产力，改造提高国防力量，改造各种社会活动，改造国家的行政，法治等等。一句话只要能划成一个完整系统，就可以用系统工程这门技术去处理。正因为如此，系统工程这门技术可以处理以各种专业的特有学科基础为系统的专业问题，而分别有各种系统工程，如表 1-3-1 所示。

从表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。为此，发展系统工程需要各个方面的科学技术工作者的通盘合作和大力协同。当然，

表 1-3-1

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
工业系统工程	工程设计	社会系统工程	社会学、未来学
科研系统工程	科学学	计量系统工程	计量学
企业系统工程	生产力经济学	农业系统工程	农事学
信息系统工程	信息学、情报学	行政系统工程	行政学 ^①
军事系统工程	军事科学	标准系统工程	标准学
经济系统工程	政治经济学	法治系统工程	法学
环境系统工程	环境科学		
教育系统工程	教育学		

① 这一名称不一定确切。

正如钱学森同志指出的那样，表中所列举的十四种系统工程也不过是一小部分，划分也许会在将来的实践中调整，但重要的一点是系统工程一定会在整个社会规模的实践中对理论提出许多现在还意想不到的问题。系统工程的理论还要大发展。将向系统科学逐步趋于完善。

§ 4 系统工程的理论基础

钱学森同志在阐述系统工程的理论基础时提出，现在科学技术包括马克思主义哲学，作为它和自然科学和数学之间桥梁的自然辩证法、作为它和社会科学之间桥梁的历史唯物主义（社会辩证法）、自然科学、数学、社会科学、然后是技术科学、工程技术。这个体系的结构可以用图 1-4-1 来表示。

从这个现代科学技术总体系来看，系统工程这门技术的理论基础包括运筹学、图论、概率论、统计学、模糊数学、计算机科学、模拟技术、经济学、哲学、心理学等，我们也用一个图 1-4-2 把它表示出来。

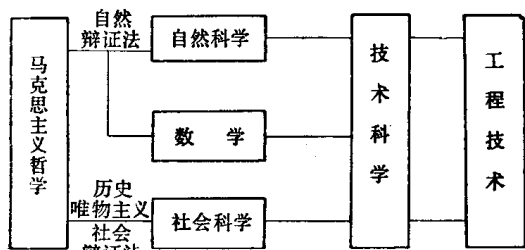


图 1-4-1

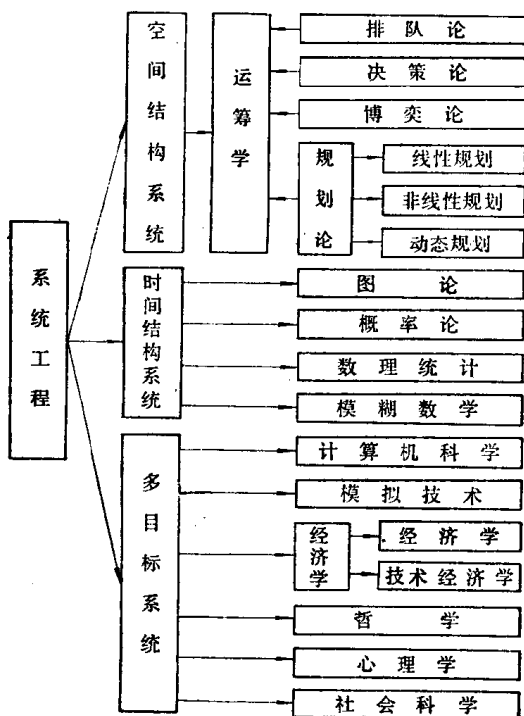


图 1-4-2

§ 5 传统方法与系统工程的区别

系统工程的实质是方法论。方法论就是把设想付诸实现的过程。传统方法与系统工程的主要区别是：

1. 三维结构分析

传统方法对目标的分析是单一的，系统工程对目标考虑则是跨学科的三维结构分析，如图 1-5-1 所示。

图中：

1) 时间维 指系统从规划到使用、更新的全过程按时间分成七个阶段：

- ① 规划阶段（按设计要求提出规划和政策）；
- ② 拟定方案（提出具体方案）；
- ③ 系统分析阶段；
- ④ 运筹阶段；
- ⑤ 系统实施阶段；
- ⑥ 运行阶段（输出）；
- ⑦ 更新阶段（按系统要求实施，取消旧系统，代之新系统，对系统改进）。

2) 逻辑维 指每个时间阶段所经历的工作步骤。分成七个步骤：

- ① 摆明问题：收集资料和数据，把问题的形成搞清楚。
 - ② 系统指标设计：确定解决问题的目标及评价标准。
 - ③ 系统综合：对达到目标的可能采取的各种策略，或系统概念化或控制行为。
 - ④ 系统分析：制定模型，对综合进行研究。
 - ⑤ 最优化：选定各个策略的参数和系数，使之最优地满足评价目标系统。
 - ⑥ 决策：选择一种或多种方案供进一步研究参考。
 - ⑦ 实施计划：修改制定此阶段上述六个步骤，并确定下来。准备进入下一阶段。
- 3) 知识维 指各工作步骤所需要的专业知识。

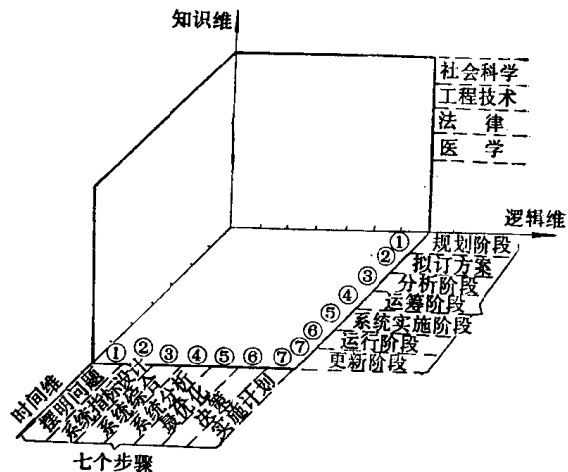


图 1-5-1

2. 系统工程的一般步骤

传统方法对事物的分析通常采用类比的方法进行，而系统工程的一般步骤则为：

- ① 问题的说明 主要是说明任务的必要性。
- ② 目标的选择 说明实质性的需求并建立一个衡量指标，据此衡量目标达到的程度。
- ③ 系统综合 可供选择的各种方案的产生。
- ④ 系统分析 在已确定的目标下，对设想的各种方案进行分析、比较。
- ⑤ 方案的选择 选择能达到目标要求的最有希望成功的方案。
- ⑥ 系统的发展 实施与完善的过程。
- ⑦ 系统的执行 系统的正常运转过程。

如图 1-5-2 就是一个大型工程设计的系统工程步骤图。

3. 软科学性

图 1-5-3 给出一个工程范围内传统方法与采用系统工程技术的区别。

在传统方法中，明确目标之后根据条件采用可能实现目标的方法，提出不同方案就可

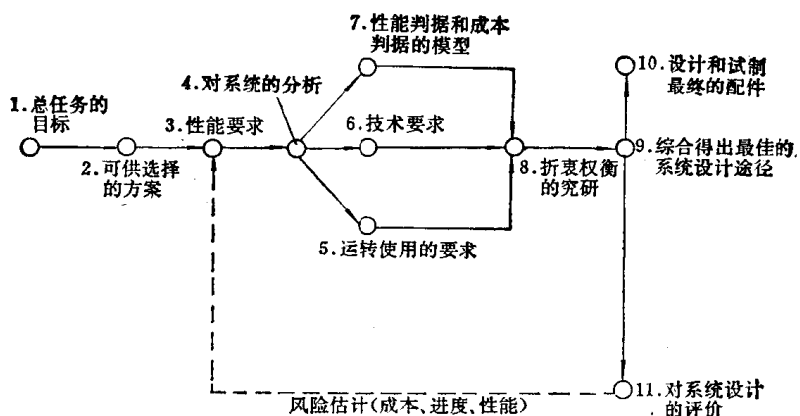


图 1-5-2

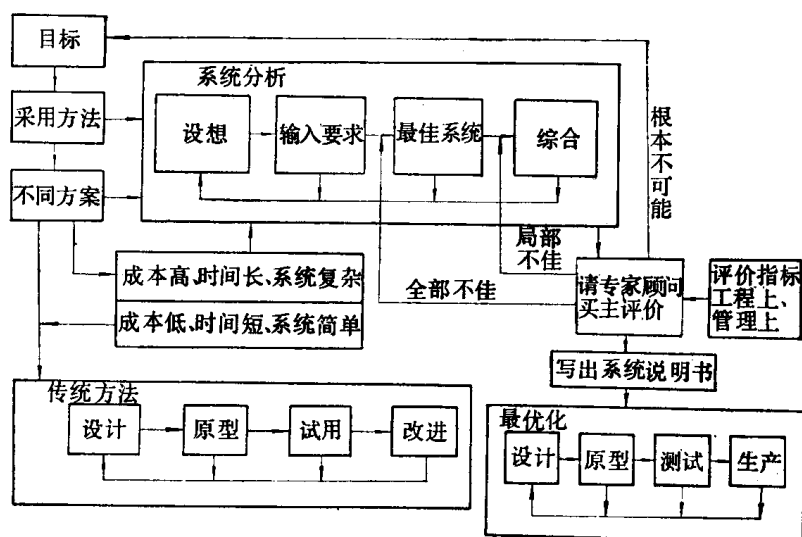


图 1-5-3

进行设计、试制出原型，经试验最终达到生产。这对花钱不多，时间不长，系统不复杂，或数量不大的系统是完全可行而且方便。

但对那些花钱多，时间长，系统复杂，或数量大的系统来说，要想成本低、效益大就不可能了。这时，在确定目标之后，先要进行系统工作，即进行设想，从系统的角度进行全面分析，按最佳系统进行综合，得出系统后请顾问专家及买主按设定的指标评价，通过后写出系统说明书，然后再转入设计、原型、测试、生产。值得注意的是整个过程都是利用电子计算机进行的，为此，这段系统工程过程有人也称为软科学。显然，由于软科学而给人们带来了省物、省时、省人的好处。这也就是当代发展系统工程的所在。

第二章 系统工程的数学方法

系统工程是一门工程技术，工程技术的特点在于改造客观世界并取得实际成果。显然，它必然有一套以系统为研究对象的分析方法。由于系统的含义十分广泛，系统工程方法也是名目繁多，技巧不少。然而其本质却都是首先建立系统模型，进而寻求最好的方法来解决系统最佳化的问题。

在这一章里，我们将分别研究这两方面的问题。

§ 1 系统模型及其形式

系统工程适用的对象是非常广泛的，有的又是非常复杂和庞大的。对系统进行分析、研究要做出直观有说服力的结果，人们往往利用模型来反映客观现实。这是因为现实很难或不可能做试验；即使可以进行试验，往往须耗费很大的人力、物力和时间；模型比现实容易操作，尤其是在模型中通过改变不同的参数看其结果这一点是现实中难于实现的。

任何一个系统总是涉及大量的因素，但是决定其现象本质的则往往只是其中的主要因素。模型不是对象本身，它是对象的抽象，反映着系统现实的主要特征，但它又高于实际而具有同类问题的共性。因此，一个模型具有如下三个特征：

- ① 它是系统的抽象或模仿；
- ② 它是由说明系统本质或特征的诸因素构成的；
- ③ 它集中表明这些因素间的关系。

在系统工程中，系统模型通常具有的表达形式为：

$$V = \phi(x_i, y_j) \quad (2-1-1)$$

其中： V ——描述系统功能、质量的效果或准则值；

x_i ——可控变量（因素），对 x_i 可以有一些约束方程或不等式以表示 x_i 有一定的取值范围；

y_j ——对 V 有影响，是一些不可控因素。

这个 V 又称目标函数，一般希望它达到最大或最小，再加上约束条件就形成了一个系统的模型。

例如，给定某厂面积为一定值的长方形，建造一个四边长度总和为 L 的围墙，如果要求需砖量最少，则一定是个正方形的院落。我们写出它的目标函数并证明这个结论。

设长方形的一边长为 x ，另一边长为 y ，则四边长度总和 L 为

$$L = 2(x + y) \quad (2-1-2)$$

求使 L 最小的 x 与 y 。

因为长方形的面积 c 为一定（即约束条件），则有

$$x \cdot y = c \quad \text{或} \quad y = \frac{c}{x} \quad (2-1-3)$$

将其代入式(2-1-2)得

$$L = 2 \left(x + \frac{c}{x} \right) \quad (2-1-4)$$

这里只有一个可控变量 x , c 为不可控变量。因为要求目标函数式 (2-1-4) 最小, 则

$$\frac{dL}{dx} = 2 \left(1 - \frac{c}{x^2} \right) = 0 \quad (2-1-5)$$

解得 $x = \sqrt{c}$ 将其代入 (2-1-3) 式得

$$y = \sqrt{c}$$

显然, 面积一定的长方形, 四边长度总和 L 最小者为四边相等, 且各边长均为 $\sqrt{c}$ 。

模型, 概括的可分为三种形式:

1) 形象模型 它是系统实体的放大或缩小, 反应着系统的物理特性, 多用在工程上。例如, 在飞机、导弹设计中利用实体模型在风洞试验中来验证、考核其飞行性能。

2) 模拟模型 是利用一组可控制的条件来代替实体, 通过模仿性的试验来了解实体的本质及其变化规律。这种模型对无法直接了解其构成因素间关系或复杂而无法以数学描述或难于求解析解的系统最为有用。例如, 要作结构物对各种地震强度的反应, 就可根据地震波的动力特性, 人为的产生纵、横向的正弦或随机震动。在用沙及岩石所建造的代表地震带上, 按着实验者的要求产生各种强度的地震。

3) 数学模型 有些系统其结构间的诸因素是可以用数学的方法(通常是一些方程式、不等式或数字资料)来描述, 并表征实体特性的, 称为系统的数学模型。这种模型最抽象, 其参数和变量最容易改变。系统工程中力求采用数学模型是因为:

(1) 它是定量化的基础。谁都知道在自然科学与工程技术中, 数量上的不准确必然导致质量上的低劣。同样, 在社会科学中没有定量的依据也会造成人为的主观片面, 其后果不仅引起经济混乱也会导致政治动荡。

(2) 它是推进科学技术发展的依据。这种例子在科学发展史上可以说比比皆是, 特别是在近代科学中更是如此。例如, 用放射性同位素来确定古文物的年代, 所依据的数学模型就是下边这个简单的微分方程:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

式中 N ——年代;

λ ——同位素的衰期;

t ——试验时间。

(3) 它是科学试验的补足手段。在实践中, 有些活动很难或不可能作出试验来显示其成果, 这时只有通过建立数学模型进行推演或模拟。例如, 阿波罗返回地面时, 在大气层上端的速度约为每秒十一公里, 次递减速约三十分钟到达地面, 为研究此过程中的现象, 如果用风洞试验, 那规模是很大的, 花费也相当可观, 而采用数学模型的方法则既经济又方便。

(4) 它是预测的工具, 即利用已有数据建立数学模型, 由模型反映的规律预测系统的未来动态。