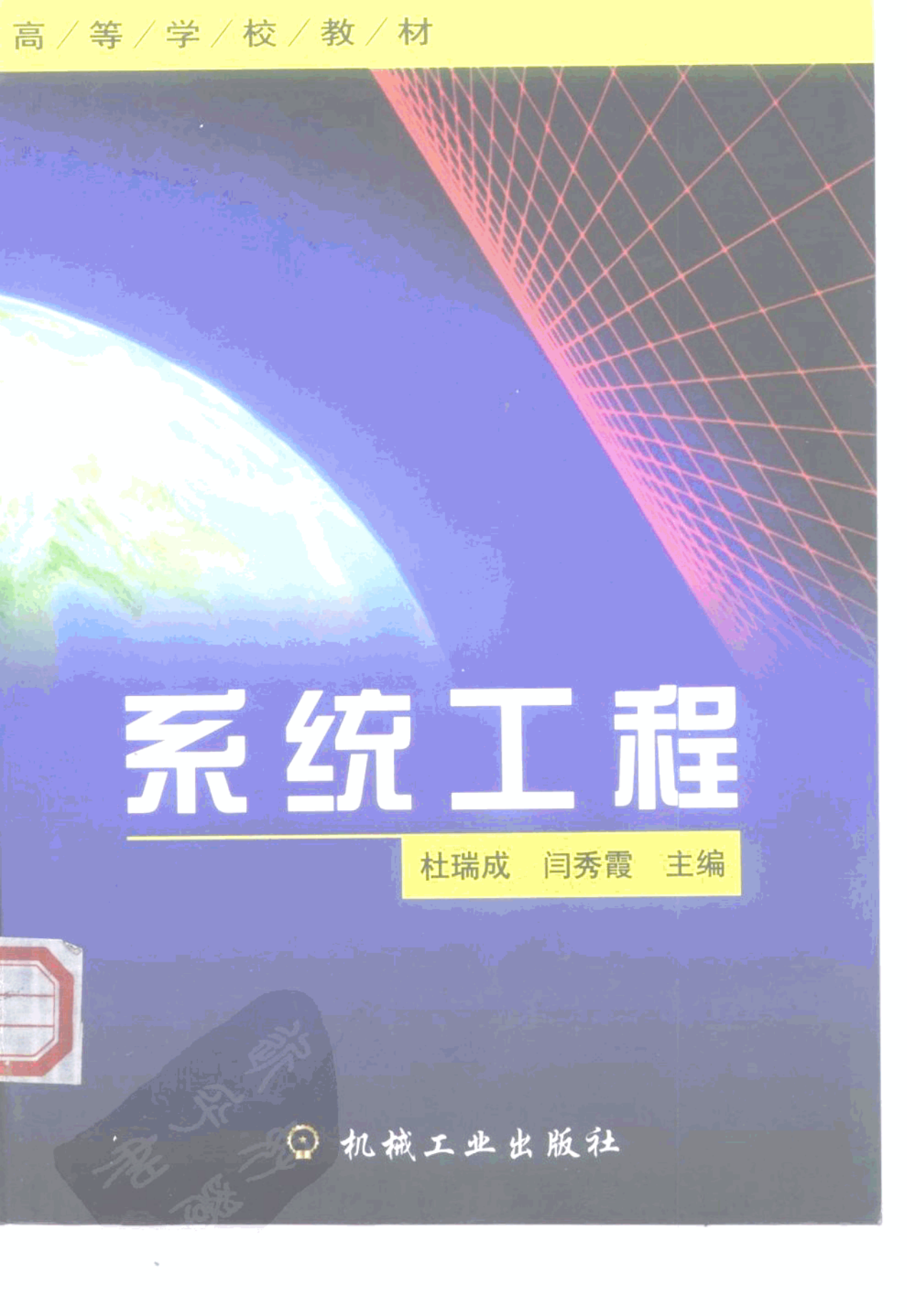


高 / 等 / 学 / 校 / 教 / 材



系统工程

杜瑞成 闫秀霞 主编



机械工业出版社

前 言

系统工程在大学中已经成为许多专业学生选修的重要课程。在科学管理与决策中,系统工程的思想和方法经常得到管理人员与领导者的应用,甚至在处理复杂问题时不能不采用系统工程。在经济、技术和社会发展日益复杂化的当代和未来,不懂得系统工程,不能用系统工程的思想和方法去解决复杂问题,就不能成为优秀的人才。这正是系统工程成为大学普遍开设的课程的原因和大學生、科技工作者以及各行各业管理工作人員学习系统工程的动力。

学习系统工程,需要较深厚的数学基础,如运筹学、数理统计等。在多年的系统工程课教学实践中我们注意到,对于非系统工程专业的大学生和一般管理工作人員,預先掌握这些数学知识,需要较多的时间和精力,且用一般的参考书学习,往往觉得学到了系统思想但解决问题时方法欠缺。为此,我们从教学和应用的角度出发编写了这本教材,力求让读者通过这门课的学习,基本掌握系统工程思想和常用系统工程方法,能够运用所学的知识解决实际问题。

全书共13章,前两章主要介绍系统的概念和系统理论,后11章介绍系统工程的常用方法。在介绍系统工程方法时,突出了应用,力求深入浅出,以系统模型的建立和求解方法为主,在保持理论体系完整性的情况下,省略了许多不必要的数学推导。用大量篇幅介绍系统工程方法,是本书不同于一般系统工程教材之处。

本书可作为大学非系统工程专业教学参考书,也可供广大管理工作人員和工程技术人员参考。书中内容较多,可以有选择地学习。选择时要注意内容的相关性。前两章必读,系统工程方法部分中,第3章至第6章属于数学规划部分,前后相关性很强;第7章至第13章则各自独立,可以单独学习。对于独立的各章,可以根据学时多少或应用需要选择其中一部分。

由于编者水平所限,加之时间仓促,书中不当甚至错误之处在所难免,诚恳希望广大读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 系统与系统工程 1

- 1 系统的基本概念 1
- 2 系统工程 5
- 3 系统工程的方法与步骤 8
- 习 题 11

第 2 章 系统分析与评价 12

- 1 系统分析概述 12
- 2 系统的模型化 16
- 3 系统分析实例 19
- 4 系统的评价 26
- 习 题 30

第 3 章 线性规划 31

- 1 线性规划问题及其数学模型 31
- 2 线性规划问题的图解法 34
- 3 线性规划问题的标准形式及其解的概念 35
- 4 单纯形法 37
- 5 改进单纯形法 47
- 6 对偶单纯形法 53
- 7 灵敏度分析 62
- 8 运输问题 69
- 习 题 82

第 4 章 整数规划 85

- 1 分枝定界法 85
- 2 0-1 型整数规划的隐枚举法 87
- 3 指派问题及其解法 89
- 习 题 100

第 5 章 目标规划 102

- 1 目标规划数学模型的建立 102
- 2 目标规划的图解法 109
- 3 目标规划的分层单纯形法 111
- 4 应用举例 113
- 习 题 115

第 6 章 动态规划 117

- 1 动态规划的基本原理和基本方程 117
- 2 机器负荷分配问题 121

3 资源分配问题 125

- 4 背包问题 129
- 5 多阶段生产安排问题 130
- 6 生产与存贮问题 132
- 7 连续型动态规划问题 134
- 习 题 136

第 7 章 存贮管理 137

- 1 存贮管理的基本概念 137
- 2 确定性存贮模型 139
- 3 随机性存贮模型 148
- 习 题 152

第 8 章 图与网络分析 154

- 1 图与网络的基本概念 154
- 2 树 157
- 3 最短路问题 161
- 4 网络最大流问题 166
- 5 网络计划技术 168
- 习 题 180

第 9 章 排队论 182

- 1 排队论概述 182
- 2 排队系统的组成及数量指标 184
- 3 到达间隔的分布和服务时间的分布 187
- 4 排队系统的数学模型 191
- 5 经济分析——系统的最优化 200
- 习 题 203

第 10 章 矩阵对策 205

- 1 对策模型的构成及分类 205
- 2 矩阵对策的基本定理 207
- 3 解矩阵对策的线性规划方法 215
- 习 题 219

第 11 章 决策分析 220

- 1 决策、决策分析及其基本要素 220
- 2 确定型决策 222
- 3 随机型决策 222
- 4 不确定型决策 227
- 5 灵敏度分析 230
- 6 情报的价值和贝叶斯决策 231

习 题	234
第 12 章 预测技术	236
1 预测概述	236
2 定性预测技术	237
3 因果关系预测方法	239
4 平滑预测技术	246
5 马尔柯夫链分析法预测	252
6 预测中的数据处理与结果评判	258

习 题	264
第 13 章 系统模拟	267
1 系统模拟概述	267
2 随机数的产生方法	268
3 静态随机模拟	272
4 动态随机模拟	275
习 题	279
附 录	280

第1章 系统与系统工程

1 系统的基本概念

1.1 系统的概念

系统这一概念来源于人类长期的社会实践，朴素的系统概念，在古代的哲学思想中得到了反映。公元前古希腊的唯物主义哲学家德谟克利特（Democritus）就曾论述了“宇宙大系统”，他认为世界是由原子和真空所组成，原子组成万物，形成不同的系统和有层次的世界。古希腊的伟大学者亚里士多德（Aristoteles）关于整体性、目的性、组织性的观点，以及关于事物相互关系的思想，可以说是古代朴素的系统概念。我国古代著名思想家老子就曾阐明自然界的统一性，他用古代朴素的唯物主义哲学思想，描述了对自然界的整体性和统一性的认识。西周时代，已用阴阳二气的矛盾统一来解释自然现象，认为金、木、水、火、土“五行”是构成世界大系统的五种基本要素。在东汉时期，古代天文学家张衡提出“浑天说”，揭示了天体运行和季节变化的关系，编制出历法和指导农业活动的二十四气节。在北魏时期，著名学者贾思勰在其名著“齐民要术”一书中，叙述了气候因素与农业发展的关系，对农业与种子、地形、耕种、土壤、水分、肥料、季节、气候诸因素的相互关系，都有辩证的叙述，并提出了如何根据天时、地利和生产条件合理地安排农事活动。周秦至西汉初年古代医学总集的“黄帝内经”，强调人体各器官的有机联系，生理现象与心理现象的联系，以及身体健康与自然环境的联系。

系统概念来源于人类长期的实践活动，但是由于古代科学技术不发达，往往只能得到分散的认识，不够深化。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，却缺乏对这一整体各个细节的认识，因而对整体性和统一性的认识也是不完全的。19世纪以来，自然科学取得了伟大的成就，特别是能量守恒、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。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。这也就是系统的实质。钱学森在“系统思想和系统工程”一文中指出：“系统思想是进行分析和综合的辩证思维和工具，它在辩证唯物主义那里取得了哲学的表达形式，在运筹学和其它系统科学那里取得了定量的表述形式，在系统工程那里获得了丰富的实践内容”。他还说明：“20世纪中期现代科学技术的成就，为系统思维提供了定量方法和计算工具，这就是系统思想如何从经验到哲学到科学，从思辨到定性到定量的大致发展情况”。

1.2 系统的定义

在自然界和人类社会中普遍存在着各种各样的系统。例如，银河系、太阳系、工业系统、农业系统、商业系统、计算机系统、原子核系统等等。可以说系统无时不在，无处不有，大至无穷，小至微粒。但目前国内外学者对系统的定义还没有统一的说法，下面列举其中几个有代表性的定义：

1) 在韦氏大辞典中，系统一词被解释为：有组织的和被组织化了的整体；结合着的整

体所形成的各种概念和原理的综合；由有规则、相互作用、相互依赖的诸要素形成的集合等等。

2) 奥地利生物学家，一般系统论的创始人贝塔朗菲把系统定义为：相互作用的诸要素的综合体。

3) 日本工业标准“运筹学术语”中对系统的定义是：许多组成要素保持有机的秩序向同一目标行动的体系。

4) 我国著名科学家、系统工程的倡导者钱学森认为：系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机体，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。

上述对系统定义的说法尽管不同，但其涵义都是接近或一致的。概括起来，我们可以把系统定义为：系统是指由两个或两个以上相互作用、相互依赖的元素组成的具有特定功能的有机整体。

1.3 系统的分类

世界上的系统千差万别，可以从不同的角度将它们分为不同的类别。

1. 自然系统与人工系统

原始的系统都是自然系统，如天体、海洋、生态系统等。人工系统都是存在于自然系统之中的，如人造卫星、海运船只、机械设备等。人工系统和自然系统之间存在着一定的界面，两者互相影响和渗透。近年来，人工系统对自然系统的不良影响已成为人们关注的重要问题，如环境污染、核军备、化学武器等。

自然系统是一个高阶复杂的均衡系统，如季节周而复始的变化形成的气象系统、食物链系统、水循环系统等。自然系统中的有机物、植物与自然环境保持了一个平衡态。在自然界中，物质流的循环和演变是最重要的，自然环境系统没有尽头，没有废止，只有循环往复，并从一个层次发展到另一个层次。

原始人类对自然系统的影响不大，但近几百年来，科技发展很快，它既造福于人类，又带来危害，甚至灾难，引起了人们极大的关注。例如，埃及阿斯旺水坝是一个典型的人工系统，水坝解决了埃及尼罗河洪水泛滥问题，但也带来一些不良影响，如东部的食物链受到破坏，渔业减产；尼罗河流域土质盐碱化加快，发生周期性干旱，影响了农业生产；由于河水污染使附近居民的健康也受到影响等。但如能运用系统工程的方法全面考虑，统筹安排，有可能得到一个既解决洪水问题又尽量减少损失的更好方案。

系统工程所研究的对象，大多是既包含人工系统又包含自然系统的复合系统。从系统的观点讲，对系统的分析应自上而下地而不是自下而上地进行，例如，研究系统与所处环境，环境是最上一级，先注意环境对系统的影响，然后再进行系统本身的研究，系统的最下级是组成系统的各个部分或要素。自然系统常常是复合系统的最上一级。

2. 实体系统与概念系统

从系统构成要素的方式来看，系统可以分为实体系统和概念系统。实体系统是指以矿物、生物、机械、能量和人等实体为构成要素所组成的系统，如机械系统、计算机系统等。概念系统是指以概念、原理、原则、方法、制度、程序等非物质实体为构成要素所组成的系统，如管理系统、教育系统、国民经济系统等。

在实际生活中，实体系统与概念系统往往是结合起来的，实体系统是概念系统的物质基

础，而概念系统又为实体系统提供指导和服务。

3. 开放系统与封闭系统

从系统与环境的关系来看，可以将系统分为开放系统和封闭系统。开放系统是指与外部环境有物质、能量和信息交换的系统，如教育系统、企业系统等。封闭系统是指与外部环境无关的系统。实际上，没有绝对的封闭系统，只是有时把与环境联系较少，相对独立的系统看作封闭系统。

4. 静态系统与动态系统

从系统的状态是否随时间变化来考虑，可将其分为静态系统和动态系统。静态系统是指决定系统特性的因素不随时间推移而变化的系统，而动态系统是指这些因素随时间的推移而变化的系统。人体系统、企业系统便是动态系统，人体内的温度、血压以及其它参数，企业的供、产、销等各个环节实际上均处于经常的变动之中。

5. 可控系统和不可控系统

从系统和人的关系上看，凡是人能够改变其状态的系统称为可控系统，反之称为不可控系统。大多数人工系统是可控的或在某种程度上是可控的，而大多数自然系统是不可控的系统。企业管理系统一般来说是不完全可控的系统。

6. 按对象划分的各种系统

按研究对象的不同系统可以划分为物质系统、生产系统、作业系统、过程系统、管理系统、社会系统、工业系统、农业系统、交通系统、通信系统等。

1.4 系统的特征

系统的特征可以归纳为以下几点：

1. 整体性

系统的整体性可以表述为，系统整体不等于各组成元素之和，即非加和原则， $1+1 \neq 2$ 。它表现为两种情况：

1) 整体小于各组成元素之和，即 $1+1 < 2$ 。如一个和尚挑水吃，两个和尚抬水吃，三个和尚没水吃。

2) 整体大于各组成元素之和，即 $1+1 > 2$ 。如“一个臭皮匠，没张好鞋样；两个臭皮匠，彼此有商量；三个臭皮匠，顶个诸葛亮”。

之所以出现上述两种情况，是由于系统的整体功能取决于一定结构的系统中的各组成元素间的协调关系。在第一种情况中，虽然每个元素的功能是良好的，但元素步调不一，协同不好，作为整体就不可能具有良好的功能，这种系统不能称之为完善的系统。在第二种情况中，虽然每个元素的功能并不很完善，但它们协同一致，结构良好，作为整体具有良好的功能。系统工程就是要使系统整体功能大于各组成元素功能之和。

2. 相关性

系统中相互关联的部分或部件形成“部件集”，“集”中各部分的特性和行为相互制约和相互影响，这种相关性确定了系统的性质和形态。

3. 目的性

人工系统和复合系统都具有一定的目的性，要达到既定的目的，系统必须具有一定的功能。没有目的的系统不属于系统工程的研究对象。自然系统不存在目的，但有功能。目的性只是人工系统和复合系统所有，而功能是所有系统都有。

4. 有序性

由于系统的结构、功能和层次的动态演变有某种方向性，因而使系统具有有序性的特点。系统的有序性可以表述为，系统是由较低级的子系统组成的，而该系统自己又是更大系统的一个子系统。

系统的有序性揭示了系统与系统之间存在着包含、隶属、支配、权威、服从的关系，统称为传递关系。换句话说，系统并不孤立出现，而是按有序性原则存在于某一层次结构中，如任何生物都可以按照生物分类的门、纲、目、科、属、种的层次确定自己的位置。又如社会是一个大系统，它包含政治、经济、军事、文教等子系统，而经济系统又包含农业、工业、商业、交通运输业等子系统，其中的工业系统又可以按照不同的分类方法分为不同的子系统，例如按所有制性质可以将工业系统分为全民所有制、集体所有制和私营工业，依次类推，可以按有序性将一个系统划分到最小的单元。

系统的有序性原则启发人们在研究解决问题时决不能离开系统的有序层次结构，并要注意上下左右的协调关系，只有这样，才能取得成功。例如对企业系统，其有序结构层次见图 1-1 所示。

作为企业系统，内部的生产、销售、财务、人事四个子系统必须相互协调，为共同的利益目标服务。如果生产部门不能生产足够的产品，必然影响销售部门的销售；而销售部门如果不能向生产部门提供准确的市场信息，生产部门就不能生产出适销对路的产品，进而又影响销售，除此之外，企业经营目标的实现还依赖于财务、人事部门的支持。

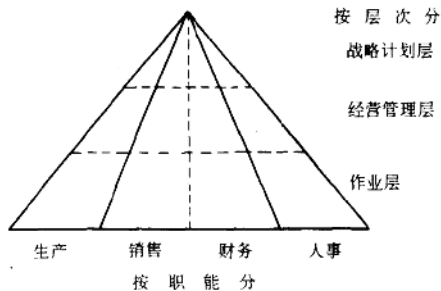


图 1-1 企业系统结构层次

5. 动态性

物质和运动是密不可分的，各种物质的特性、形态、结构、功能及其规律性，都是通过运动表现出来的，要认识物质首先要研究物质的运动，系统的动态性使其具有生命周期。开放系统和外界环境有物质、能量和信息的交换，系统内部结构也可以随时间变化。一般来讲，系统的发展是一个有方向性的动态过程。

6. 环境适应性

任何一个系统都存在于一定的物质环境（更大的系统）之中，它必然要与外界环境产生物质、能量和信息的交换，外界环境的变化必然会引起系统内部各要素之间的变化。因此为了保持和恢复系统原有特性，系统必须具有对环境的适应能力，这就像元素必须适应系统一样，因为系统 + 环境 = 更大的系统。系统的环境适应性要求我们，研究系统时必须放宽眼界，不但要看到整个系统本身，还要看到系统的环境和背景。只有在一定的背景上考察系统，才能看清系统的全貌；只有在一定的环境中研究系统，才能有效地解决系统问题。系统对于环境的适应性，主要靠反馈来实现。例如一个企业系统要在激烈的市场竞争中处于不败之地，必须建立完善的反馈环节来适应瞬息万变的市场环境（包括市场上的竞争对手、产品销路、原材料供应、国家宏观政策等等）的变化，企业若不能适应这些变化，则必然被市场所淘汰。生物的淘汰与进化最明显地说明了系统对环境的适应性是何等重要。

1.5 系统的结构与功能

1.5.1 系统的结构

大千世界有各种各样的系统，每种系统的具体结构大不一样，大系统的结构往往是很复杂的，但是从一般的意义上讲，系统的结构可以用以下式子表示：

$$S = \{\Omega, R\} \quad (1-1)$$

式中 S ——代表系统；

Ω ——代表元素的集合；

R ——表示元素之间的各种关系的集合。

由式 (1-1) 可知，作为一个系统，必须包括其元素的集合与元素之间关系的集合，两者缺一不可。两者结合起来，才能决定一个系统的具体结构与特定功能。

1.5.2 系统的功能

各种系统的特定功能是大不一样的，从一般的意义上讲，系统的功能如图 1-2 所示。

系统的输入是作为原材料的物质、能量与信息，系统的输出是经过处理（或转换、或加工）的物质、能量与信息，例如产品、人才、成果、服务等等。所以，系

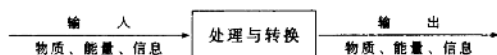


图 1-2 系统的功能

统可以解释为一种处理或转换机构，它把输入转变为人们所需要的输出。从狭义上讲，处理或转换就是系统的功能。例如：企业系统的基本功能就是把各种原材料（包括物质、能量、信息）经过转换，变为人们所需要的产品。扩大一些讲，把输入和输出也作为系统的功能。对于闭环系统，往往还把反馈作为系统的功能。

系统工程的任务，旨在提高系统的功能，特别是提高系统的处理或转换的效率，即在一定输入条件下，使得输出多、快、好；或者，在一定的输出要求下，使得输入少而省。在特殊场合，我们需要削弱或破坏系统的功能。例如在战争中，我方必须千方百计破坏敌方这个系统的功能，摧毁这个系统的结构。最后需要特别说明的是系统工程追求的是系统的功能或总体效果最优，但并不要求系统的所有组成元素都孤立地达到最优。另一方面，系统的所有组成元素都孤立地达到了最优并不意味着一定有系统功能或总体效果的最优。这里面有一个协调问题，有一种“抓总”的工作，即整个系统的合理组织与管理。这正是系统工程所要做的工作。

2 系统工程

2.1 系统工程的定义

系统工程这个词来源于英文“System Engineering”。概括地讲，系统工程是在系统科学结构体系中，属于工程技术类，它是一门新兴的学科，是以系统为研究对象的工程技术，国内外有一些学者对系统工程的含义有过不少的阐述，但至今仍无统一的定义。现列举一些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。

(1) 1975 年美国科学技术辞典注释 系统工程是研究许多密切联系的元素所组成的复杂系统设计的科学。在设计时，应有明确的预定功能和目标，并使得各个组成元素之间以及各元素与系统整体之间有机联系，配合协调，从而使系统整体能够达到最佳的目标。同时还要考虑到参与系统中人的因素与作用。

(2) 1977 年日本学者三浦武雄指出 系统工程与其它工程学的不同之处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学科。因为系统工程的目的是研制一个系统, 而系统不仅涉及到工程学的领域, 还涉及社会、经济和政治等领域。所以为了适当地解决这些问题, 除了需要某些纵向技术外, 还要有一种技术从横的方向把它们组织起来, 这种横向的技术就是系统工程。

(3) 日本工业标准“运筹学术语”中的定义 系统工程学是为了最优地达到系统目标而对系统的构成要素、组织结构、信息流通和控制机构进行分析的技术。

(4) 我国学者钱学森认为 系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验与使用的科学方法, 是一种对所有系统都具有普遍意义的方法。

(5) 我国学者林延江认为 系统工程是用系统论的观点、控制论的基础、信息论的理论、经济管理科学的实质、现代数学的最优化方法、电子计算机和其它有关工程学科的技术融合渗透而形成的一门综合性的管理工程技术。

从以上观点可以看出, 系统工程是在系统思想的指导下, 用近代数学方法和计算机工具来研究一般系统的分析、规划、开发、设计、组织、管理、调整、控制、评价等问题, 使系统整体最佳地实现预期目标的一门综合性的工程技术。

也有人把系统的分析、综合、模拟、最优化等, 称为狭义的系统工程, 即我们常说的系统工程, 而把为了合理地进行系统的研制、设计、运用等工作所采用的思想、程序、组织、方法等内容称为广义的系统工程。

系统工程作为一门工程技术, 用以改造客观世界并取得实际效果, 这与一般所说的常规工程学(如机械工程、管理工程、机电工程、土木工程等)有很大的不同, 主要表现在:

1) 常规工程学以自己特定的物质为对象, 而系统工程则不限于某一特定的物质对象, 各种自然的、生态的、人类的、企业的和社会的组织等都可以作为它的研究对象。因此, 系统工程不是某一类系统的工程技术, 而是研究各种系统的普遍规律的一门学问。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。当然系统工程这门技术离不开具体的环境和条件, 即与系统本身所在的学科有密切的关系。依据学科的不同, 系统工程有着很多的门类, 如工程系统工程、环境系统工程、企业系统工程、社会系统工程等。

2) 系统工程具有多学科综合性的特点, 它不仅应用自然科学, 而且也要用到其它工程技术, 如管理科学、经济学、社会学、乃至心理学、生态学和医学等知识。现代自然科学的发展, 出现了两方面的趋势, 一是高度细化, 一是高度综合。系统工程是高度综合的产物, 是研制大系统、跨学科的科学, 它讲究整体、综合和联系, 只有应用各种学科的广泛知识, 才有可能有效地规划、设计、管理和控制一个复杂的系统。

3) 常规工程学多着眼于技术的合理性, 往往是利用组成元素的良好程度来确保和维持整个系统的总体功能。而系统工程则是从整个系统的最优出发, 首先确定整体的目标, 然后再参照这个目标来决定各元素所必须的性能, 并利用各元素间的巧妙联系和协调运转来实现总体目标。这样做往往更能提高整个系统的水平。

系统工程作为一门工程技术, 在现代科学技术体系中具有一定的地位。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为理论基础的技术科学这一层次, 再就是基础科学这一层次, 最后是通过进一步综合, 提炼达到最高概括的马克思主义哲

学。其中基础科学包括自然科学、数学和社会科学。在此基础上，他又进一步提出了一个清晰的系统科学的结构。系统科学是由系统工程这类工程技术、系统工程的理论基础（像运筹学、控制论、信息论这类技术科学）以及它们的基础科学——系统学所组成的一个新兴科学技术。

系统工程的理论基础包括系统论、信息论、控制论、运筹学等科学技术，其中运筹学是系统工程最重要的理论基础，它的主要分支有规划论（线性规划、整数规划、非线性规划、目标规划、动态规划等），对策论，决策论，排队论，存贮论，图与网络技术，仿真技术等。

控制论也是系统工程的理论基础之一，它包括有古典控制论、现代控制论和大系统理论。特别是现代控制论和大系统理论，近年来在系统工程中得到了越来越多的应用，已成为系统工程的主要理论基础。

应该特别指出的是，系统工程除了上述理论基础外，另一个重要的基础是计算机科学和计算机技术。可以这样说，没有这个基础，系统工程也就发挥不了多大的作用。这是因为对于一个复杂的系统，涉及的变量有成千上万，要从许许多多的方案中选优，没有电子计算机是根本不可能实现的。

2.2 系统工程的形成与发展

系统工程是以已有的科学和技术为基础，将各种科学和技术融合起来，而又重新体系化了的科学与方法。系统工程是在工业工程、质量管理、人机工程、价值工程以及计算机科学等学科的基础上发展起来的。

系统工程的发展大致可以分为萌芽、发展和初步成熟三个时期。

1. 萌芽时期

在古代，人们就有了系统工程思想的萌芽。我国战国时期的都江堰水利工程就孕育着系统工程的一些思想。本世纪初，美国的泰勒从合理安排工序、分析工人的操作、提高劳动生产率入手，研究管理科学的规律，到20年代逐步发展为工业工程，主要研究生产在时间和空间上的管理技术。30年代，美国的贝尔电话公司提出了系统途径的观点，1940年采用系统工程这个词，在研究发展微波通信网时，应用一套系统工程的方法论，取得了良好的效果。

在第二次世界大战期间，由于军事上的需要，人们提出并发展了运筹学，以后在应用中逐渐发展成为系统工程的理论基础。战后这种理论被迅速推广到经济和管理领域。1945年美国建立了兰德公司，研究复杂系统的数学分析方法。以后，美国对国防系统、宇航系统以及交通、电力、通信等大规模的系统进行了研究开发，取得了很多成果。在40年代后期，出现了控制论、信息论，并制造了世界上第一台电子计算机。这些都为系统工程的发展奠定了基础。

2. 发展时期

1957年，美国的H.H.Goode和R.E.Machol合著出版了《系统工程》一书，从此，系统工程作为专门术语沿用至今。这时，许多运筹学的成果开始大量应用到民用系统中，成为经营管理的手段，同时运筹学本身也在不断发展。1958年美国在北极星导弹的研制中，首次采用了计划评审技术（PERT），有效地推进了计划管理。现在PERT方法已为大多数先进企业采用，任何计划必须以PERT形式说明。PERT方法以及由它派生的方法已成为系统工程的重要内容。60年代开始，计算机在西方普遍使用，为系统工程的发展与应用提供了

强有力的手段。同时，人们对复杂的大系统采用分解和协调的方法解决具有多级逆阶控制结构的问题。

3. 初步成熟时期

1965年美国学者R.E.Machol编写了《系统工程手册》一书，内容包括系统工程的方法论、系统环境、系统部件（主要以军事工程及人造地球卫星的各个主要组成部分为部件）、系统理论、系统技术以及一些数学基础。此书基本概括了系统工程各方面的内容，使系统工程形成了比较完整的体系。以后，许多学者著书立说，使系统工程这一学科趋于完善。始于1961年的美国阿波罗登月计划中广泛运用了系统工程，特别是PERT技术、仿真技术等新型技术。在此期间，日本引入系统工程并应用于质量管理等方面，取得了显著效果。前苏联则在发展控制论和自动化系统基础上发展了系统工程。

我国近代的系统工程研究可以追溯到50年代，1956年，中国科学院在钱学森、许国志教授的倡导下，建立了第一个运筹学小组；60年代，著名数学家华罗庚大力推广了统筹法、优选法；与此同时，在著名科学家钱学森领导下，在导弹等现代化的总体设计组织方面，取得了丰富经验，国防尖端科研“总体设计部”取得显著效果。1977年以来，系统工程的推广和应用出现了新局面，1980年成立了中国系统工程学会，与国际系统界进行了广泛的学术交流。近年来，系统工程在各个领域都取得了许多成果。

3 系统工程的方法与步骤

系统工程作为一种相对独立完整的知识体系，应具有一套科学的工作方法和步骤。但是，由于系统工程所研究的系统各种各样，情况复杂，不可能有一种在任何情况下都能套用的不变的模式。因而它只是一种处理问题的一般步骤与方法，是一种基于原则的系统思考过程。在实际运用它的时候，虽然基本上遵循这一基本原则，但是由于每个人的具体情况不同，所运用的方法与步骤是多样的；由于具体对象的不同，所运用的方法与步骤也各不相同。

通常情况下，系统工程思考问题和处理问题的方法，一般称为系统方法，它是在深入研究系统概念、系统的基本组成和性质的基础上，把研究对象作为系统来考虑进行分析、设计、创造和运用的基本思想方法，这种方法体系的实质就是运用系统思想和各种数学方法以及电子计算机工具来实现系统的模型化和最优化，以此进行系统分析和系统设计。系统工程思考问题和处理问题时是按一定的工作程序进行的。在此我们介绍美国贝尔电话公司的霍尔于1969年提出的工程学的三维结构，如图1-3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。

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 按客观需要，探索应建立什么样的系统，提出建立这个系统的目的，制定出系统工程活动的规划。

(2) 拟定方案 提出具体的计划方案。

(3) 研制阶段 根据拟定的方案进行系统研制，并制定出生产计划。

(4) 生产阶段 生产和加工出系统的全部零、部件，并提出安装计划。

(5) 安装实验阶段 把制成的零部件按照计划组装成系统，并完成调试工作。

(6) 运行阶段 系统按照预定的功能投入使用。

(7) 更新阶段 根据系统运行情况, 对原系统不断地进行改进, 或取消旧系统以新系统代之。

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个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、分析和处理问题时遵循的一般程序, 即:

(1) 摆明问题 按系统的观点, 弄清需要解决什么问题, 希望达到什么要求。尽量全面地收集有关要解决问题的历史、现状和发展趋势的资料和数据。

(2) 系统指标设计 提出所解决问题希望达到的目标, 并制定出衡量是否达到目标的评价指标。

(3) 系统综合 按照问题的性质和系统目标的要求, 提出若干个替代方案, 对每个替代方案都列出其费用、资源消耗、功能等指标, 并说明其优缺点。

(4) 系统分析 通过建立模型, 把所有替代方案与系统的评价指标联系起来, 以便对这些方案进行分析比较。

(5) 系统优化 精心选择方案中的参数, 使各替代方案都尽量均衡地满足系统的评价指标最优。

(6) 决策 根据系统优化的结果, 选出最优方案。若最优方案有多个时, 进一步考虑一些定性目标, 最后决策出一个或几个方案。

(7) 实施计划 根据最后选定的方案, 拟定具体的实施计划, 并组织实施, 如果实施中遇到问题, 则需返回到相应的步骤, 不断修改, 直到完善为止。

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知识。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。钱学森教授认为: “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”。

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。在运用系统工程解决问题时, 非常强调组成综合学

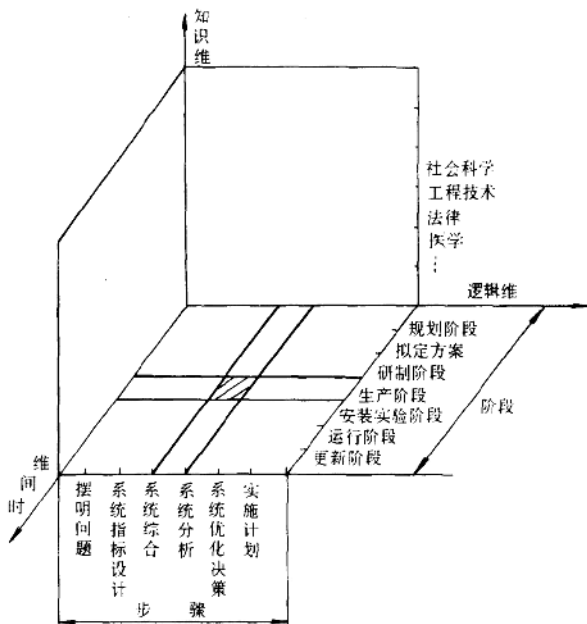


图 1-3 霍尔的三维结构

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。

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与步骤。其实施过程如下：

1. 建立管理组织机构，明确职责分工

由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。

整个管理过程分为五个方面：①确定计划的基本要求；②测量性能；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。

2. 制定和选择方案

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，曾归纳出三种备选方案：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。在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和权衡利弊之后，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，从而成为被选用的最终方案。

3. 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”的系统分析方法，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。这样使整个计划的进度、财务和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测量。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、飞行合格鉴定及飞行准备审查等。

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的主要目标。与此同时，还要分析工作进度与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的费用未能达到预期工效。

管理过程的第四个方面是控制与指导。由于研制过程中不可避免的一些变化，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、功能的任何变化，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。

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。

习 题

1-1 试举例分析系统的概念和特征。

1-2 简述系统方法论的特点。

第2章 系统分析与评价

1 系统分析概述

1.1 系统分析的意义

在科学技术高度发达的现代社会里,事物间的联系日趋复杂,出现了各种形式的大系统,如全国铁路调度系统、城市交通管理系统、区域电网的调度和自动调节系统、军事系统等。这类大系统通常都是开放性系统,它们与所处的环境即更大的系统之间发生着物质、能量和信息等的交换关系,从而构成了环境约束。系统同环境的任何不适应即违反环境约束状态的行为都将对系统的存在产生不利的影响,例如,人口的过快增长与膨胀影响人们生活水平的提高,大量污染物的倾泻使人类生存环境受到威胁,大气层空间的变化对全球环境产生影响等。除此之外,从系统内部看,它们通常由许多层次的子系统组成。系统与子系统之间存在着复杂的关系,如纵向的上下关系,横向的平行关系以及纵横交错的相互关系等等。但是不管这些关系如何复杂,有一条基本原则是不变的,那就是下层系统以达成上层系统的目标为任务,横向各个子系统必须用系统总目标协调行动,各附属子系统要为实现系统整体目的而存在。因此,任何子系统的适应或不健全,都将对系统整体的功能和目标产生不利的影响;系统内各子系统的上下左右之间往往会出现各种矛盾因素和不确定的因素,这些因素能否及时了解,掌握和正确处理,将影响到系统整体功能和目标的达成。系统本身的功能和目标是否合理也有研究分析的必要。不明确,不恰当的系统目标和功能,往往会给系统的生存带来严重的后果。系统的运行和管理,要求有明确的指导方针。上述情况表明不管从系统的外部或内部,不论是设计新系统或是改进现有系统,系统分析都非常重要。

1.2 系统分析的概念

关于系统分析的概念有许多种说法,现就最具一般特征的几种观点分述如下:

(1) 日本“OR事点”(运筹学字典)所列的菲沙尔(G.H.FISHER)的定义:系统分析对相关目的以及为达到该目的所采取的战略方针,做系统的探讨工作。在可能的情况下,对替代方案的费用、效益以及风险进行对比,以期决策者有可能对未来发展,选择有益的对策。

(2) 企业管理百科全书(中国台湾版)认为“为了发挥系统的功能及达到系统的目标,若就费用与效益两种观点,运用逻辑的方法对系统加以周详的分析、比较、考察和试验,而制定一套经济有效的处理步骤或程序,或对原有的系统提出改进方案的过程,则称为系统分析”。

上述概念表明,系统分析是一个有目的有步骤的分析和探索过程。在这个过程中,系统分析人员在若干选定的目标和准则下,分析构成各项事物的许多子系统的功能及其相互之间的关系。利用定量方法提供允许和可用的数据,借以制定可行方案,并推断可能产生的效果,以期寻求使系统整体效益最佳的策略。所以系统分析对于整体问题目标的设定、方法的选择、有效资源的最佳调配,以及行动策略的决定等,都是有效的工具。

系统分析通常借助于各种模型,以及模拟试验,以求得最佳的设计方案,使对系统整体有利。采用系统分析方法对事物进行探讨时,决策者可以获得对问题的综合的和整体的认识,既不忽略内部各因素的相互关系,又能顾全外界环境变化所可能带来的影响。特别是通过信息,及时反映系统的作用状态,随时都能了解和掌握新形势的发展。在已知的情况下,以最有效的策略解决复杂的问题,以期顺利地达到系统的各项目标。

系统分析的主要工具是电子计算机。通过计算机来完成系统分析所需的大量信息的收集、处理、分析、汇总、传递和贮存等任务,系统分析的主要方法是最优化方法,如规划论(包括线性规划、非线性规划、整数规划、目标规划、动态规划)、图论与网络分析、排队论等。使用最优化方法来求解系统的各种模型。

系统分析不同于一般的技术经济分析,它是从系统的整体最优出发,对系统进行定性分析和定量分析。它不仅分析技术经济方面的有关问题,而且还要分析政策、组织体制、信息、物流等方面的问题。

1.3 系统分析的要素

系统分析的要素主要包括目标、替代方案、费用、效果、模型和评价准则。

(1) 目标 系统的目标是系统目的的具体化,是系统分析的基础。对于系统分析人员在系统分析的开始及其进行过程中要反复明确系统的目标。如果经过反复论证,认为系统的目标不合理、不合适,也可以经过系统的提出者的同意,加以必要的调整,以确定技术经济上既先进又合理,既可行又必需的系统目标。确定系统目标的本身也是一项重要的系统分析内容。

(2) 替代方案 在概略设计阶段,常常需要制定出为达到系统预定目标的若干种方案,以供进一步比较和选择,没有足够数量的方案就没有优化,只有在性能、费用、时间等指标上互有长短并能进行对比的方案才称得上是替代方案。

(3) 费用 建立一个系统都需要一定的人力、物力、财力等的投入,于是就产生了费用,此处所说的费用还应包括延长时间造成的机会损失。

(4) 效果 系统在运行后总会产生一定的效果,系统的效果有能换算成货币的和不能换算成货币的两种。

(5) 模型 模型是系统分析的重要因素,通过模型可以预测出各种替代方案的性能、费用、效果、时间等指标的情况,以利于方案的分析和比较模型的优化与评价。

(6) 评价准则 评价准则是评价各种方案优劣的标准。通过评价准则对各种方案进行综合,确定出各方案的优劣顺序。根据系统的不同性质和要求,可以选用不同的评价准则。

1.4 系统分析的原则

进行系统分析时应该遵循的原则有:

1. 内部因素和外部条件相结合

构成一个系统,不仅受到内部因素的影响,而且也受到外部条件的制约,例如设计一个企业,作为一个系统,不仅要受到企业本身的各种因素,如生产类型、生产过程、生产环节、物流和信息流的相互制约,而且要受到外部自然环境、市场状况、协作和运输情况等外部因素的影响,所以进行系统分析时,必须把内部因素和外部条件结合起来综合分析。

2. 当前利益和长远利益相结合

恩格斯早就告诫我们:“……不要过于得意我们对自然界的胜利。对于我们的每一次胜