目　录

第一章　系统与系统工程 …… 1
§1.1　系统的概念与定义 …… 1
1.1.1　系统概念 …… 1
1.1.2　系统的定义 …… 1
§1.2　系统科学与系统学的发展 …… 2
§1.3　系统的特征与分类 …… 3
1.3.1　系统的特征 …… 3
1.3.2　系统的分类 …… 4
§1.4　系统工程的产生与发展 …… 5
1.4.1　系统工程的含义 …… 5
1.4.2　系统工程的发展历史 …… 6
§1.5　系统工程的方法与步骤 …… 8
§1.6　大系统和复杂巨系统 …… 11
参考文献 …… 15
第二章　系统学基础 …… 16
§2.1　引言 …… 16
§2.2　系统自组织现象 …… 17
§2.3　一些基本概念 …… 18
§2.4　系统理论概述 …… 24
2.4.1　一般系统论 …… 24
2.4.2　耗散结构的概念 …… 29
2.4.3　协同学原理 …… 34
2.4.4　初等突变理论 …… 38
2.4.5　混沌、分维与分形 …… 41
§2.5　应用 …… 51
参考文献 …… 52
第三章　系统目标 …… 53
§3.1　系统目标及其意义 …… 53
§3.2　目的、目标及属性 …… 53
§3.3　目标树 …… 54
§3.4　目标间的价值权衡 …… 56
3.4.1　价值权衡的本质 …… 56
3.4.2　确定权重系数的实用方法——两两比较法 …… 57

需要全本请访问 www.ertongbook.com

参考文献 …… 61
第四章 系统模型 …… 62
§4.1 系统建模的目的和模型分类 …… 62
§4.2 系统结构模型和邻接矩阵 …… 63
4.2.1 系统的结构模型 …… 63
4.2.2 邻接矩阵和可达矩阵 …… 65
4.2.3 结构模型法(ISM 法) …… 69
§4.3 主成分分析法(PCA 法) …… 73
§4.4 因子分析法 …… 83
§4.5 聚类分析法 …… 88
§4.6 系统动态仿真模型——系统动力学模型 …… 97
参考文献 …… 104
第五章 系统优化及多目标优化与决策分析 …… 106
§5.1 系统优化方法概述 …… 106
§5.2 多目标优化与决策分析的基本步骤和非劣解 …… 110
§5.3 多目标优化与决策的基本方法 …… 116
5.3.1 求解多目标优化问题非劣解集的约束法 …… 116
5.3.2 目的规划法 …… 118
§5.4 交互式多目标决策与满意解的概念 …… 119
参考文献 …… 124
第六章 决策分析 …… 125
§6.1 决策、决策分析及其基本要素 …… 125
§6.2 决策问题的分类 …… 126
§6.3 决策过程 …… 126
§6.4 单目标决策分析方法 …… 127
6.4.1 确定性情况下决策分析方法 …… 127
6.4.2 风险情况下决策分析方法 …… 128
6.4.3 不确定性情况下决策分析方法 …… 130
§6.5 多目标决策 …… 132
6.5.1 多目标决策问题的数学描述 …… 132
6.5.2 一般决策方法概述 …… 133
6.5.3 效用理论 …… 133
6.5.4 层次分析法 …… 136
§6.6 决策支持系统 …… 140
参考文献 …… 141
第七章 系统可靠性 …… 142
§7.1 系统可靠性的概念和基本数量指标 …… 142
7.1.1 可靠性工程与系统工程 …… 142

7.1.2 系统可靠性的含义 …… 142
7.1.3 系统可靠性的有关概念 …… 143
7.1.4 系统可靠性的数量指标 …… 146
§7.2 系统可靠性模型 …… 148
7.2.1 系统可靠性逻辑框图 …… 148
7.2.2 串联系统可靠性模型 …… 149
7.2.3 并联系统可靠性模型 …… 150
7.2.4 混联系统可靠性模型 …… 151
7.2.5 n 中取 k 的表决系统模型 …… 151
7.2.6 储备系统(冗余系统)可靠性模型 …… 152
7.2.7 桥式系统 …… 153
§7.3 可靠性分析与预计 …… 154
7.3.1 事件树分析(ETA) …… 154
7.3.2 故障树分析(FTA) …… 155
7.3.3 可靠性预计 …… 156
§7.4 可靠性设计与分配 …… 158
7.4.1 可靠性设计与分配的概念 …… 158
7.4.2 代数分配法 …… 158
7.4.3 加权分配法 …… 159
7.4.4 非线性规划问题中的乘子法 …… 161
7.4.5 动态规划法 …… 161
7.4.6 提高系统可靠性的技术措施 …… 162
7.4.7 人-机功能的合理分配与人员可靠性分析 …… 163
7.4.8 可靠性管理 …… 164
参考文献 …… 164
第八章 项目的经济分析和评价 …… 165
§8.1 货币的时间价值和利率 …… 165
§8.2 方案选择与经济评价 …… 168
8.2.1 单方案的经济评价 …… 168
8.2.2 多方案的经济评价 …… 170
§8.3 企业亏盈均衡点法 …… 172
§8.4 财务评价和国民经济评价 …… 173
参考文献 …… 174
第九章 计划与调度网络分析技术 …… 176
§9.1 工程项目的作业计划 …… 176
9.1.1 主要时间参数 …… 178
9.1.2 作业图参数的计算方法 …… 180
§9.2 关键路线法(CPM) …… 181

§9.3 计划评审技术(PERT) …… 183
§9.4 图评审技术(GERT) …… 186
9.4.1 GERT 的符号说明 …… 186
9.4.2 应用举例 …… 188
参考文献 …… 190
第十章 模糊集理论及其在系统工程中的应用 …… 191
§10.1 模糊现象与模糊集理论 …… 191
§10.2 模糊集合的基本运算 …… 193
§10.3 模糊关系和模糊矩阵运算 …… 196
10.3.1 两个论域 X,Y 积集的模糊子集 R …… 196
10.3.2 两个模糊子集的笛卡尔积 …… 196
10.3.3 模糊推理合成法则 …… 197
§10.4 模糊聚类分析和模糊综合评判 …… 198
10.4.1 模糊聚类分析 …… 198
10.4.2 模糊综合评判 …… 199
§10.5 模糊规划 …… 203
10.5.1 模糊约束条件下的极值问题 …… 203
10.5.2 模糊线性规划 …… 205
§10.6 模糊控制和模糊系统 …… 208
10.6.1 模糊控制的基本思路 …… 208
10.6.2 模糊控制系统的数学表达式 …… 209
参考文献 …… 210
第十一章 应用实例分析 …… 211
§11.1 人口发展的数学模型 …… 211
§11.2 投入产出方法及其应用 …… 216
11.2.1 投入产出法的基本原理 …… 216
11.2.2 直接消耗系数和完全消耗系数 …… 219
11.2.3 投入产出法在经济管理中的应用 …… 220
11.2.4 动态投入产出模型 …… 224
11.2.5 投入产出世界模型 …… 227
§11.3 区域规划的系统工程方法 …… 229
11.3.1 城市性质、功能分析及城市发展目标的确定 …… 230
11.3.2 城市系统综合模型 …… 231
11.3.3 区域发展策略优化分析 …… 233
11.3.4 区域规划研究与区域规划实施跟踪研究 …… 234
§11.4 河流污染治理规划的系统分析 …… 235
§11.5 计算机集成制造系统(CIMS) …… 240
11.5.1 问题的提出和 CIMS 的概念 …… 240

11.5.2 CIMS 的组成 …… 241
11.5.3 实施 CIMS 应注意的问题 …… 242
§11.6 制造资源管理系统(MRP-Ⅰ) …… 244
11.6.1 问题的提出及 MRP-Ⅰ的发展 …… 244
11.6.2 MRP 的基本原理 …… 244
11.6.3 闭环 MRP 和 MRP-Ⅱ …… 245
11.6.4 MRP-Ⅱ …… 246
11.6.5 主生产排程 MPS …… 247
参考文献 …… 249
附录 …… 251

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一章　系统与系统工程

§1.1　系统的概念与定义

1.1.1　系统概念

系统概念来源于古代人类的社会实践和科学总结，系统这个词早在古希腊时代就已使用。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虚空所组成，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，是古代关于系统的一种朴素概念。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了"浑天说"，揭示了天体运行和季节变化的联系，编制出历法和指导农业活动的廿四气节。在北魏时期，著名学者贾思勰在其名著"齐民要术"一书中，叙述了气候诸因素与农业发展的关系，对农作与种子、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。

系统这一概念来源于人类长期的实践活动，但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能力，因而对整体性和统一性的认识也是不完全的。对自然界这个统一体各个细节的认识，是近代自然科学的任务。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。这也就是系统概念的实质。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，从思辩到定性到定量的大致发展情况"。

1.1.2　系统的定义

系统这个词来自拉丁语的 systema，一般认为是"群"与"集合"的意思。

在韦氏(webster)大辞典中，"系统"一词定义为"有组织的或被组织化的整体"，是"形

成集合整体的各种概念、原理的综合”，是“以有规律的相互作用或相互依存形式结合起来的对象的集合”。

因此，系统可定义为具有一定功能的、相互间具有有机联系的、由许多要素或构成部分组成的整体。一般系统论的创始人，L. V. 贝塔朗菲(L. V. Bertalanffy)把“系统”定义为“相互作用诸要素的综合体”。美国著名学者 R. L. 阿柯夫(R. L. Ackoff)认为：“系统是由两个或两个以上相互联系的任何种类的要素所构成的集合”。

综上所述，系统是可以分解的，一个系统可以是一个更大系统的组成部分，而该系统本身又可包含若干个子系统。因此，系统是有层次的，任一个系统都有它的层次结构、规模、环境与功能。

系统的反义词是混沌或混乱(chaos)，混沌是指无序或杂乱无章的集合。系统的同义词是组织、体系等，但这些同义词还不能完全反映各部分的有机联系。

§1.2 系统科学与系统学的发展

20 世纪以来，科学知识已发展成一百多种学科，科学从哲学中分离出来也已有一个多世纪。系统科学是与自然科学和社会科学并列的基础科学，是一门独立于其他各门科学的学科。系统科学是在研究控制论、信息论、运筹学和一般系统论的过程中发展起来的，从系统科学这一类研究系统的基础科学出发，结合其他基础科学，组成一系列研究系统共同问题的技术科学，这些科学统称为系统学。

控制论(cybernetics)是 1947 年由 N. 维纳(N. Wiener)提出的。从狭义上说，控制论研究的是工程中的伺服理论；从广义上说，它包括了许多领域，如工程控制论、生物控制论、经济控制论等。控制论的发展在科学上有重大意义，最优控制理论在自然、社会、经济领域中都有广阔应用前景。

一般系统论(general systems theory)在 40 年代后期逐渐形成，它来源于观察生物和生命现象，一般系统论用于研究复杂系统时，找到了科学的统一理论和多学科相互关系的共同基础。1950 年 L. V. 贝特朗菲(L. V. Bertalanffy)对一般系统论进行了描述，提出了不同学科间的信息沟通问题。一般来说，多种学科虽然在科学方法上有相似性，但不同学科之间的沟通是很困难的，一个领域中的科学概念和假设很难应用到另一个领域中去。例如，在人体学和生命科学、社会学和行为科学、人类学三者之间找学科联系是相当困难的。而贝特朗菲则认为“在不同领域中，表现出了结构上的相似性和同构性”，因此，一般系统论的任务是找到不同学科之间的共同语言或科学术语，并注重强调系统的开放性。

在不同学科领域里，有一种研究各学科间有序结构的方法，即对基本的行为单元，按其复杂性构成一个有层次的结构。布丁(Boulding)曾提出过一种有 9 个层次的结构：

(1) 静态结构层，如地球、太阳系和天体等；

(2) 简单动态层，如化学、物理等；

(3) 调节与控制层，如温度的控制与调节、信息的传播和变换等；

(4) 细胞层。该层有明显的生命自保持结构；

(5) 植物层。该层由植物和微生物生态世界组成，并建立了一种系统结构；

(6) 动物层。动物有可移动性，会产生有目的的行为和自我感觉；

(7) 人类层。开始有自我意识，使用劳动工具和文字符号；

(8) 社会组织和活动层，包括人类的生产活动，信息在社会上的传递，价值观、文艺、历史以及复杂的人类社会关系等；

(9) 尚未知层。这一层的问题的复杂性或系统结构和关系尚不清楚，研究中常作假说或假定。

以上是一种分析系统的9个层次的框架结构。一般系统论认为，各种学科都可在这种框架中找到一定的位置，科学家们也可以在其中比较各种概念和学说，找到各学科间的相似点和不同之处，这对学科间的信息交换和学科发展将大有裨益。

有关系统或系统生成的科学称为系统学。显然，交叉学科的形成和发展有力地推动了系统科学的进展。

§1.3 系统的特征与分类

1.3.1 系统的特征

系统的特征可归纳为以下几点：

(1) 整体性。如上所述，系统是由相互依赖的若干部分组成，各部分之间存在着有机的联系，构成一个综合的整体，以实现一定的功能。这表现为系统具有集合性，即构成系统的各个部分可以具有不同的功能，但要实现系统的整体功能。因此，系统不是各部分的简单组合，而要有统一性和整体性，要充分注意各组成部分或各层次的协调和连接，提高系统的有序性和整体的运行效果。

(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) 目的性和功能。大多数系统的活动或行为可以完成一定的功能，但不一定所有系统都有目的，例如太阳系或某些生物系统。人造系统或复合系统都是根据系统的目的来设定其功能的，这类系统也是系统工程研究的主要对象。例如，经营管理系统要按最佳经济效益来优化配置各种资源；军事系统为保全自己，消灭敌人，就要利用运筹学和现代科学技术组织作战，研制武器。

(4) 环境适应性。一个系统和包围该系统的环境之间通常都有物质、能量和信息的交换，外界环境的变化会引起系统特性的改变，相应地引起系统内各部分相互关系和功能的变化。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，例如反馈系统、自适应系统和自学习系统等。

(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。开放系统与外界环境有物质、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) 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。一般系统论的一个重要成果是把生物和生命现象的有序性和目的性同

系统的结构稳定性联系起来，也就是说，有序能使系统趋于稳定，有目的才能使系统走向期望的稳定系统结构。

1.3.2 系统的分类

1. 自然系统和人造系统

原始的系统都是自然系统，如天体、海洋、生态系统等。人造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。人造系统和自然系统之间存在着界面，两者互相影响和渗透。近年来，人造系统对自然系统的不良影响已成为人们关注的重要问题，如核军备、化学武器、环境污染等。

自然系统是一个高阶复杂的均衡系统，如季节周而复始地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造系统，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；由于河水污染使附近居民的健康受到影响等。但如能运用系统工程方法来全面考虑，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，大多是既包含人造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，先注意系统对环境的影响，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. 实体系统和抽象(概念)系统

所谓实体系统，是指以物理状态的存在作为组成要素的系统，这些实体占有一定空间，如自然界的矿物、生物，生产部门的机械设备、原始材料等。与实体系统相对应的是抽象概念系统，它是由概念、原理、假说、方法、计划、制度、程序等非物质实体构成的系统，如管理系统、法制、教育、文化系统等。近年来，逐渐将概念系统称之为软科学系统，并日益受到重视。

以上两类系统在实际中常结合在一起，以实现一定功能。实体系统是概念系统的基础，而概念系统又往往对实体系统提供指导和服务。例如，为实现某项工程实体，需提供计划，设计方案和目标分解，对复杂系统还要用数学模型或其他模型进行仿真，以便抽象出系统的主要因素，并进行多个方案分析，最终付诸实施。在这一过程中，计划、设计、仿真和方案分析等都属于概念系统。

3. 静态系统和动态系统

系统的静和动都是相对的。从某种意义上讲，可以认为在宏观上没有活动部分的结构系统或相对静止的结构系统为静态系统，例如大桥、公路、房屋等。而动态系统指的是既有静态实体又有活动部分的系统，例如学校就是一个动态系统，它不仅有建筑物，还有教师

和学生。

在中世纪以前，人们曾认为宇宙现象是永恒不变的，习惯将事物看成是恒定的，静止的，这种看法在哲学上是唯心的或机械唯物论的。随着科学的发展和人类的进步，才逐渐认识到世界不是恒定事物的集合体，而是动态过程的集合体，运动是永恒的。宇宙是一个动态系统，静态是相对的。

4. 开放系统和封闭系统

封闭系统是一个与外界无明显联系的系统，环境仅仅为系统提供了一个边界，不管外部环境有什么变化，封闭系统仍表现为其内部稳定的均衡特性。封闭系统的一个实例就是密闭罐中的化学反应，在一定初始条件下，不同反应物在罐中经化学反应达到一个平衡态。

开放系统是指在系统边界上与环境有信息、物质和能量交互作用的系统。例如商业系统、生产系统或生态系统，这些都是开放系统。在环境发生变化时，开放系统通过系统中要素与环境的交互作用以及系统本身的调节作用，使系统达到某一稳定状态。因此，开放系统常是自调整或自适应的系统。

§1.4 系统工程的产生与发展

1.4.1 系统工程的含义

系统工程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，国内外有一些学者对系统工程的含义有过不少阐述，但至今仍无统一的定义。

1978年我国著名学者钱学森指出："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方法"。

1977年日本学者三浦武雄指出："系统工程与其他工程学不同之点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领域的问题，除了需要某些纵向技术以外，还要有一种技术从横的方向把它们组织起来，这种横向技术就是系统工程"。

1975年美国科学技术辞典的论述为："系统工程是研究复杂系统设计的科学，该系统由许多密切联系的元素所组成。设计该复杂系统时，应有明确的预定功能及目标，并协调各个元素之间及元素和整体之间的有机联系，以使系统能从总体上达到最优目标。在设计系统时，要同时考虑到参与系统活动的人的因素及其作用。"

从以上各种论点可以看出，系统工程是以大型复杂系统为研究对象，按一定目的进行设计、开发、管理与控制，以期达到总体效果最优的理论与方法。

系统工程是一门工程技术，用以改造客观世界并取得实际成果，这与一般工程技术问题有共同之处。但是，系统工程又是一类包括了许多类工程技术的一大工程技术门类，与一般工程比较，系统工程有三个特点。

(1) 研究的对象广泛，包括人类社会、生态环境、自然现象和组织管理等。

(2) 系统工程是一门跨学科的边缘学科。不仅要用到数、理、化、生物等自然科学，还

要用到社会学、心理学、经济学、医学等与人的思想、行为、能力等有关的学科，是自然科学和社会科学的交叉。因此，系统工程形成了一套处理复杂问题的理论、方法和手段，使人们在处理问题时，有系统的整体的观点。

(3) 在处理复杂的大系统时，常采用定性分析和定量计算相结合的方法。因为系统工程所研究的对象往往涉及到人，这就涉及到人的价值观、行为学、心理学、主观判断和理性推理，因而系统工程所研究的大系统比一般工程系统复杂得多，处理系统工程问题不仅要有科学性，而且要有艺术性和哲理性。

1.4.2 系统工程的发展历史

系统工程作为一门科学技术虽然形成于本世纪中叶，但系统工程的思想方法和实际应用可追溯到远古时代。中华民族的祖先在了解和改造自然的辛勤实践和大量的社会活动中，早有许多朴素的系统概念和应用实例。

在军事方面，早在公元前500年的春秋时期，就有著名的军事家孙武写出了"孙子兵法"十三篇，指出战争中的战略和策略问题，如进攻与防御、速决和持久、分散和集中等之间的相互依存和相互制约的关系，并依此筹划战争的对策，以取得战争的胜利。其著名论点，"知己知彼，百战不殆"，"以我之长，攻敌之短"等，不仅在古代，而且在当代的战争中都有指导意义，在当今激烈的国际市场竞争和社会经济各个领域的发展中，这些论断也有现实意义。战国时期，著名军事家孙膑继承和发展了孙武的学说，著有"孙膑兵法"，在齐王与田忌赛马中，孙膑提出的以下、上、中对上、中、下对策，使处于劣势的田忌战胜齐王，这是从总体出发制定对抗策略的一个著名事例。

在水利建设方面，战国时期，秦国太守李冰父子主持修建了四川都江堰工程。这一伟大水利工程巧妙地将分洪、引水和排沙结合起来，使各部分组成一个整体，实现了防洪、灌溉、行舟、漂木等多种功能，至今，该工程仍在发挥着重大的经济效益，是我国古代水利建设的一大杰出成就。

在建设施工方面，北宋真宗年间，皇城失火，宫殿烧毁，大臣丁谓主持了皇宫修复工程。他采用了一套综合施工方案，先在需要重建的通衢大道上就近取土烧砖，在取土后的通衢深沟中引入汴水，形成人工河，再由此水路运入建筑材料，从而加快了工程进度。皇宫修复后，又将碎砖废土填入沟中，重修通衢大道。使烧砖、运输建筑材料和处理废墟三项繁重工程任务协调起来，从而在总体上得到了最佳解决，一举三得，节省了大量劳力、费用和时间。

在医学、农业等方面，我国古代也有许多著名学者用朴素的系统思想和方法取得了伟大成就，这些都为我们今天研究和发展系统工程的理论体系，提供了宝贵的借鉴和重要的启示。

近代科学技术的发展，特别是计算机的出现和广泛使用，使系统工程在世界范围内迅速发展起来，许多国家有不少成功的重大研究成果。

第一次提出"系统工程"这一名词的是1940年在美国贝尔电话公司试验室工作的E. C. 莫利纳(E. C. Molina)和在丹麦哥本哈根电话公司工作的A. K. 厄朗(A. K. Erlang)，他们在研制电话自动交换机时，意识到不能只注意电话机和交换台设备技术的研究，还要

需要全本请访问 www.ertongbook.com

从通信网络的总体上进行研究。他们把研制工作分为规划、研究、开发、应用和通用工程等五个阶段，以后又提出了排队论原理，并应用到电话通信网络系统中，推动了电话事业的飞速发展。系统工程的萌芽时期可追溯到本世纪初的F. W. 泰勒(F. W. Taylor)系统。为了提高工效，泰勒研究了合理工序和工人活动的关系，探索了管理的规律，1911年他的"科学管理的原理"一书问世后，工业界出现了"泰勒系统"。

在第二次世界大战时期，一些科学工作者以大规模军事行动为对象，提出了解决战争问题的一些决策和对策的方法和工程手段，出现了运筹学。当时英国为防御德国的突然空袭，研究了雷达报警系统和飞机降落排队系统，取得了很多战果。在这一时期中，英、美等国在反潜、反空袭、商船护航、布置水雷等项军事行动中，应用了系统工程方法，取得了良好的效果。1940年至1945年，美国制造原子弹的"曼哈顿"计划，由于应用了系统工程方法进行协调，在较短的时间内取得了成功。1945年，美国建立了兰德公司(RAND Corp.)，应用运筹学等理论方法研制出了多种应用系统，在美国国家发展战略、国防系统开发、宇宙空间技术以及经济建设领域的重大决策中，发挥了重要作用，"兰德"又被誉为"思想库"和"智囊团"。50年代后期和60年代中期，美国为改变空间技术落后于苏联的局面，先后制定和执行了北极星导弹核潜艇计划和阿波罗登月计划，这些都是系统工程在国防科研中取得成果的著名范例。阿波罗登月计划是一项巨大的工程，从1961年开始，持续了11年。该工程有三百多万个部件，耗资244亿美元，参加者有两万多个企业和120个大学与研究机构。整个工程在计划进度、质量检验、可靠性评价和管理过程等方面都采用了系统工程方法，并创造了"计划评审技术(PERT)"和"随机网络技术"[又称"图解评审技术(GERT)"]，实现了时间进度、质量技术与经费管理三者的统一。在实施该工程的过程中及时向各层决策机构提供信息和方案，供各层决策者使用，保证了各个领域的相互平衡，如期完成了总体目标。计算机的迅速发展，为该复杂大系统的分析提供了有力的工具。

70年代以来，随着微型计算机的发展，出现了分级分布控制系统和分散信号处理系统，扩展了系统工程理论方法的应用范围。近年来，社会、经济与环境综合性的大系统问题日益增多，如环境污染、人口增长、交通事故、军备竞赛等。许多技术性问题也带有政治、经济的因素，如北欧跨国电网的供电问题。这个电网有水、火、核等多种能源形式，规模庞大，电网调度本身在技术上已相当复杂，而且还要受到各国经济利益冲突、地理条件限制、环境保护政策制约和人口迁移状况的影响，因此，负荷调度的目标和最佳运行方式的评价标准十分复杂，涉及多个国家社会经济因素。该电网的系统分析者要综合这些因素，对4500万千瓦的电力做出合理的并能被接受的调度方案，提交各国讨论、协调和决策，这是个典型的系统工程问题。

我国近代的系统工程研究可追溯到50年代。1956年，中国科学院在钱学森、许国志教授的创导下，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，在导弹等现代化武器的总体设计组织方面，取得了丰富经验，国防尖端科研的"总体设计部"取得显著成效。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，与国际系统工程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。

§1.5 系统工程的方法与步骤

所谓系统工程的方法论，是指在更高的层次上，指导人们正确地应用系统工程的思想、方法和各种准则去处理问题。由于系统工程是一类包括许多门工程技术的一大工程技术门类，而且是高度综合的实用性很强的技术，因此，在系统工程的研究中，逐渐形成一些处理问题的基本框架结构，其中，A. D. 霍尔(A. D. Hill)1969 年提出的三维结构有一定代表性。

霍尔的三维结构体系由时间维、逻辑维和知识维构成，结构表如图 1.1 所示。

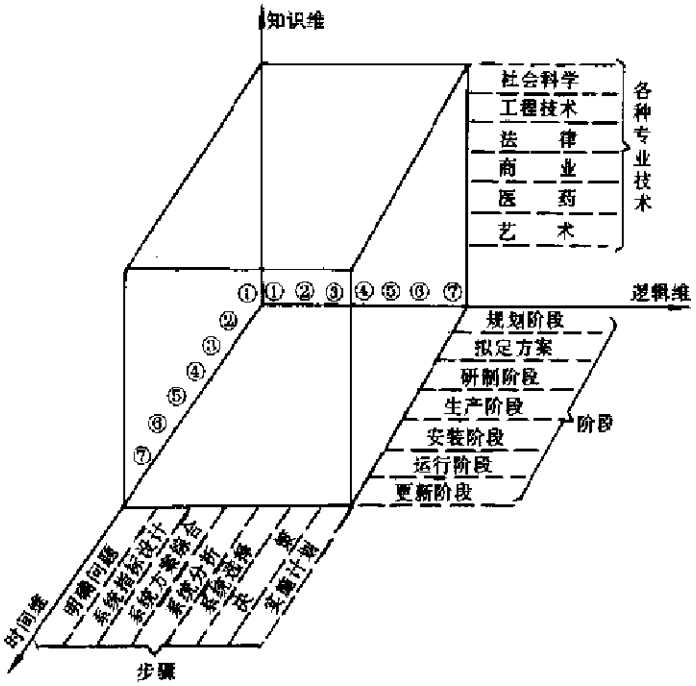


图 1.1　三维结构

图 1.1 中，时间维反映了系统实现的过程。它可分为 7 个阶段，即：规划阶段——按设计要求提出系统目标，制定规划；拟定方案阶段——进行初步设计；系统开发设计和研制阶段；投入生产或施工阶段；安装阶段；运行阶段——要考虑消耗和折旧；更新阶段等。

逻辑维表示了用系统工程方法解决问题的步骤，大体也分为 7 步，即，明确问题——了解问题所处的环境，收集有关的数据和资料；系统指标设计——确定所要解决问题的目标和评价准则；系统综合——为实现预期目标，拟定所需采取的策略和应选择的方案。系统分析——深入了解所提出的政策措施和解决方法，分析这些措施方法在实施中的预期效果；系统方案的优化选择——用数学规划等定量的优化方法去判别各种方案优劣，以进行方案选择；决策——这一步骤包含了人的参与，反映了决策者的偏好等；实施计划——按决策结果制定实施方案和计划。

知识维。由于系统是个综合性的交叉学科，在上述各阶段中，执行任一个步骤都会涉

及多种专业技术，如社会科学、工程技术、法律、商业、医药、艺术等，而且领域还在不断发展，系统分析者要不断扩大自己的知识面。

三维结构体系形象地描述了系统工程研究的框架，对其中任一阶段和每一个步骤，又可进一步展开，形成了分层次的树状体系。下面将逻辑维的 7 个步骤逐项展开讨论，可以看出，这些内容几乎覆盖了系统工程理论方法的各个方面。为便于叙述，后面将系统分析放在系统综合前讨论。

1. 明确问题

由于系统工程研究的对象复杂，包含自然界和社会经济各个方面，而且研究对象本身的问题有时尚不清楚，如果是半结构性或非结构性问题，也难以用结构模型定量表示。因此，系统开发的最初阶段首先要明确问题的性质，特别是在问题的形成和规划阶段，搞清楚要研究的是什么性质的问题，以便正确地设定问题，否则，以后的许多工作将会劳而无功，造成很大浪费。国内外学者在问题的设定方面提出了许多行之有效的方法，主要有：

(1) 直观的经验方法。这类方法中，比较知名的有头脑风暴法(Brain Storming)，又称智暴法、5W1H 法、KJ 法等，日本人将这类方法叫做创造工程法。这一方法的特点是总结人们的经验，集思广益，通过分散讨论和集中归纳，整理出系统所要解决的问题。

(2) 预测法。系统要分析的问题常常与技术发展趋势和外部环境的变化有关，其中有许多未知因素，这些因素可用打分的办法或主观概率法来处理。预测法主要有德尔菲法、情景分析法、交叉影响法、时间序列法等。

(3) 结构模型法。复杂问题可用分解的方法，形成若干相关联的相对简单的子问题，然后用网络图方法将问题直观地表示出来。常用的方法有解释结构模型法(ISM 法)、决策实验室法(DEMATEL 法)、图论法等。其中，用图论中的关联树来分析目标体系和结构，可以很好地比较各种替代方案，在问题形成、方案选择和评价中是很有用的。

(4) 多变量统计分析法。用统计理论方法所得到的多变量模型一般是非物理模型，对象也常是非结构的或半结构的。统计分析法中比较常用的有因子分析法、主成份分析法等，成组分析和正则相关分析也属此类。

此外，还有利用行为科学、社会学、一般系统理论和模糊理论来分析，或几种方法结合起来分析，使问题明确化。

2. 建立价值体系或评价体系

评价体系要回答以下一些问题：评价指标如何定量化，评价中的主观成分和客观成分如何分离，如何进行综合评价，如何确定价值观问题等。行之有效的价值体系方法有以下几种。

(1) 效用理论。该理论是从公理出发建立的价值理论体系，反映了人的偏好，建立了效用理论和效用函数，并发展为多属性和多隶属度效用函数。

(2) 费用/效益分析法。多用于经济系统评价，如投资效果评价、项目可行性研究等。

(3) 风险估计。在系统评价中，风险和安全性评价是一个重要内容，决策人对风险的态度也反映在效用函数上。在多个目标之间有冲突时，人们也常根据风险估计来进行折衷评价。

(4) 价值工程。价值是人们对事物优劣的观念准则和评价准则的总和。例如，要解决

的问题是否值得去做，解决问题的过程是否适当，结果是否令人满意等。以生产为例，产品的价值主要体现在产品的功能和质量上，降低投入成本和增加产出是两项相关的准则。价值工程是个总体概念，具体体现在设计、制造和销售各个环节的合理性上。

3. 系统分析

不论是工程技术问题还是社会环境问题，系统分析首先要对所研究的对象进行描述，建模的方法和仿真技术是常采用的方法，对难以用数学模型表达的社会系统和生物系统等，也常用定性和定量相结合的方法来描述。系统分析的主要内容涉及以下几方面。

（1）系统变量的选择。用于描述系统主要状态及其演变过程的是一组状态变量和决策变量，因此，系统分析首先要选择出能反映问题本质的变量，并区分内生变量和外生变量，用灵敏度分析法可区别各个变量对系统命题的影响程度，并对变量进行筛选。

（2）建模和仿真。在状态变量选定后，要根据客观事物的具体特点确定变量间的相互依存和制约关系，即构造状态平衡方程式，得出描述系统特征的数学模型。在系统内部结构不清楚的情况下，可用输入输出的统计数据得出关系式，构造出系统模型。系统对象抽象成模型后，就可进行仿真，找出更普遍、更集中和更深刻反映系统本质的特征和演变趋势。现已有若干实用的大系统仿真软件，如用于随机服务系统的 GPSS 软件，用于复杂社会经济系统仿真的系统动力学(SD)软件等。

（3）可靠性工程。系统可靠性工程是研究系统中元素的可靠性和由多个元素组成的系统整体可靠性之间的关系。一般讲，可靠的元件是组成可靠系统的基础，然而，局部的可靠性和整体可靠性间并非简单的对应关系，系统工程强调从整体上来看问题。在 40 年代，冯·诺依曼(Von Neumann)开始研究用重复的不那么可靠的元件组成高度可靠系统的问题，并进行了可靠性理论探讨。钱学森教授也提出，现在大规模集成电路的发展使元器件的成本大大降低，如何用可靠性较低的元器件组成可靠性高的系统，是个很有现实意义的问题。近年来，已采用的可靠性和安全性评价方法有 FTA 或 ETA 等树状图形方法。

4. 系统综合

系统综合是在给定条件下，找出达到预期目标的手段或系统结构。一般来讲，按给定目标设计和规划的系统，在具体实施时，总与原来的设想有些差异，需要通过对问题本质的深入理解，作出具体解决问题的替代方案，或通过典型实例的研究，构想出系统结构和简单易行的能实现目标要求的实施方案。

系统综合的过程常常需要有人的参与，计算机辅助设计(CAD)和系统仿真可用于系统综合，通过人机的交互作用，引入人的经验知识，使系统具有推理和联想的功能。近年来，知识工程和模糊理论已成为系统综合的有力工具。

5. 系统方案的优化选择

在系统的数学模型和目标函数已经建立的情况下，可用最优化方法选择使目标值最优的控制变量值或系统参数。所谓优化，就是在约束条件规定的可行域内，从多种可行方案或替代方案中得出最优解或满意解。实践中要根据问题的特点选用适当的最优化方法，目前应用最广的仍是线性规划和动态规划，非线性规划的研究很多，但实用性尚有待改进，大系统优化已开发了分解协调的算法。组合优化适用于离散变量，整数规划中的分枝定界法，逐次逼近法等的应用也很广泛。多目标优化问题的最优解处于目标空间的非劣解

集上，可采用人机交互的方法处理所得的解，最终得到满意解。当然，多目标问题也可用加权的方法转换成单目标来求解，或按目标的重要性排序，逐次求解，例如目标规划法。

6. 决策

“决策就是管理”，“决策就是决定”，人类的决策管理活动面临着被决策系统的日益庞大和日益复杂。决策又有个人决策和团体决策、定性决策和定量决策、单目标决策和多目标决策之分。战略决策是在更高层次上的决策。

在系统分析和系统综合的基础上，人们可根据主观偏好、主观效用和主观概率做决策。决策的本质反映了人的主观认识能力，因此，就必然受到人的主观认识能力的限制。近年来，决策支持系统受到人们的重视，系统分析者将各种数据、条件、模型和算法放在决策支持系统中，该系统甚至包含了有推理演绎功能的知识库，使决策者在做出主观决策后，力图从决策支持系统中尽快得到效果反应，以求得到主观判断和客观效果的一致。决策支持系统在一定条件下起到决策科学化和合理化的作用。但是，在真实的决策中，被决策对象往往包含许多不确定因素和难以描述的现象，例如，社会环境和人的行为不可能都抽象成数学模型，即使是使用了专家系统，也不可能将逻辑推演、综合和论证的过程做到像人的大脑那样，有创造性的思维，也无法判断许多随机因素。

群决策有利于克服某些个人决策中主观判断的失误，但群决策过程比较长。为了实现高效率的群决策，在理论方法和应用软件开发方面，许多人做了大量工作。如多人多目标决策理论、主从决策理论、协商谈判系统、冲突分析等，有些应用软件已实用化。

7. 制定计划

有了决策就要付诸实施，实施就要依靠严格的有效的计划。以工厂为例，为实现工厂的生产任务和发展战略目标，就要制定当年的生产计划和未来的发展规划。厂内还要按厂级、车间级和班组级分别制定实施计划。一项大的开发项目，涉及设计、开发、研究和施工等许多环节，每个环节又涉及组织大量的人、财、物。在系统工程中常用的计划评审技术(PERT)和关键路线法(CPM)在制定和实施计划方面起了重要的作用。

§1.6 大系统和复杂巨系统

从系统工程和现代控制理论的观点来看，规模庞大、结构复杂的各种工程的或非工程的系统都是大系统，如大的钢铁联合企业、全国铁路调动系统、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。近年来，随着技术的发展和工业化步伐的加快，社会、经济、技术和环境等许多方面都已形成了许多以“大”为特征的系统，这些大系统的特征不仅是物理系统大或占空间多，而且还相互影响和制约。例如，人口增长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。社会文明系统涉及到人的思想、行为、政治活动和文明程度，显然更为复杂。

根据组成系统的子系统数以及子系统种类的多少和它们之间关联关系的复杂程度，把系统分为简单大系统和复杂巨系统两大类。简单大系统是指组成系统的子系统数目相对比较少，一般为几十到几百个，各子系统之间的关系比较简单。研究这类系统可从系统间的相互作用出发，直接综合成全系统的运行功能，满足目标要求。非生命系统属于这类

系统。

当子系统数量上万，甚至上亿，就称为巨系统，如果这些子系统种类多，又有层次结构，关联关系也复杂，就是复杂巨系统。当这个系统又是开放的，就称为开放的复杂巨系统。例如，生物系统、人脑系统、人体系统、社会系统和星系系统等。这些开放复杂巨系统与外界有能量、信息和物质的交换，这些系统的结构、功能和演变行为都很复杂，目前尚不很清楚。例如，人脑有10^{12}个神经元，还有同样多的胚质，其作用关系十分复杂。又如，人体本身就是一个复杂巨系统，而由人组成的社会，当然是更为复杂的巨系统。为了制定国家的各项政策，推动社会经济的改革，就必须研究复杂的社会经济巨系统。

开放的复杂巨系统，目前还没有形成从微观到宏观的理论，也还没有从子系统相互作用出发，形成统计力学的理论。长期以来，科学家们已注意到，生命系统和非生命系统二者表现出似乎截然不同的规律。非生命系统通常服从热力学第二定律，系统总是自发的趋于平衡态和无序，系统的熵达到最大，系统自发地由有序变到无序，而无序却决不会自发地转变到有序，这就是系统的不可逆性和平衡态的稳定性。但是，生命系统却相反，生物进化、社会发展总是由简单到复杂，由低级到高级，越来越有序，这类系统能够自发地形成有序的结构。这两类系统的矛盾现象，长期得不到解释。直到60年代，耗散结构和协同学的出现，才为解决这一问题提供了一个科学的理论框架。这些理论认为：热力学第二定律所揭示的是孤立系统（和环境没有物质和能量的交换）在平衡态和近平衡态（线性非平衡态）条件下的规律。但生命系统通常是开放系统，并且远离平衡态（非线性非平衡态），系统通过和环境进行物质和能量的交换，引进负熵流，尽管系统内部产生正熵，但总的熵却在减少，在达到一定条件时，系统就可能从原来的无序状态自发地转变为在时间、空间和功能上的有序状态，产生一种新的稳定的有序结构。普里戈金（Prigogine）称其为耗散结构，耗散结构沟通了两类系统的内在联系，说明在不违背热力学第二定律的条件下，两者之间没有真正的严格界线。普里戈金指出："复杂性不再仅仅在于生物学了，它正在进入物理学领域，似乎已经根植于自然法则之中"。哈肯（Haken）进一步指出，一个系统从无序转化为有序的关键并不在于系统是平衡和非平衡，也不在于离平衡态有多远，而是由组成系统的各子系统，在一定条件下，通过它们间的非线性作用，互相协同和合作，自发地产生稳定的有序结构，这就是自组织结构。但是耗散结构和协同学理论仍难以用于定量分析开放的复杂巨系统。

由钱学森教授领导的系统科学研究组对复杂巨系统进行了深入的研究，他们指出：实践证明，现在能用的，唯一有效处理开放的复杂巨系统的方法就是定性和定量相结合的综合集成方法。在这些研究中，通常是科学理论、经验知识和专家判断力相结合，提出经验性假设（判断或猜想），而这些经验往往是定性的认识，可用经验数据和具有很多个参数的模型来进行检验，定性认识并不是严谨的科学表达方式，经过模型定量计算，再反复调查和比较，最后才能形成一定的科学结论。实际上，人工智能领域中的许多重要工作就是从系统角度考虑的，如研究定性推理以及对结构、行为、功能的描述等。

下面列举一些当代人们关心的几个复杂巨系统的问题，这些问题已引起许多学者的关注。

（1）全球资源减少和资源开发管理问题。世界自然资源的分布是很不均匀的，人们消

需要全本请访问 www.ertongbook.com