



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校教材

# 系统工程

第2版

# XITONG GONGCHENG

杜瑞成 闫秀霞 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



赠多媒体课件





普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校教材

# 系 统 工 程

第 2 版

主 编 杜瑞成 闫秀霞  
副主编 程钧漠 李 霞  
参 编 王侃昌 高建中



机 械 工 业 出 版 社

本书第2版根据系统工程的学科发展和教学实践,除保留了原书的结构外,在内容上对第1版进行了全面地修订,充实了大部分章节的内容,增加了模型的案例分析和计算机的运用,并被教育部评为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。主要内容有:系统与系统工程、系统分析与评价、线性规划、整数规划、目标规划、动态规划、存储论、图与网络分析、排队论、对策论、决策分析、预测技术等。本书内容突出了应用,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并用大量篇幅介绍系统工程方法。

本书可作为大学本科管理专业教材,也可供非系统工程专业师生和广大管理工作者及工程技术人员参考。

本书配有多媒体课件,凡一次性购书30本以上者免费赠送一份多媒体课件。请与本书责任编辑余茂祚联系(联系电话010—88379759)。

## 图书在版编目(CIP)数据

系统工程/杜瑞成,闫秀霞主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2007.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.高等学校教材

ISBN 978-7-111-07300-0

I. 系… II. ①杜…②闫… III. 系统工程—高等学校—教材 IV. N945

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第077351号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:余茂祚 责任编辑:余茂祚 版式设计:冉晓华

责任校对:刘志文 封面设计:马精明 责任印制:李妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2007年8月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·21.5印张·529千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-07300-0

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

本书系1999年出版的高等学校教材《系统工程》的第2版,是教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

经过多年来的教学实践,我们积累了大量宝贵的教学经验和社会实践资料。特别是进入了21世纪,随着科学技术的飞速进步及政治、经济、军事等的巨大变化,使人们面对的不再是单一的事件。而对于非单一事件,在决策过程中,管理科学毫无疑问地表现出了越来越强的生命力。系统及系统工程的理论和方法作为管理科学中的重要组成部分,已经成为管理决策过程中必不可少的工具及依据之一。

自本书第1版出版至今已有8年时间,原版中的内容已不能满足当前教学及科研的需要,故在保持原书基本结构的基础上对其内容进行了充实和修订,力求臻于完美,以便于学生学习和使用。

从系统与实用的角度出发,为便于教学及加深对理论的理解,对重点章节增加了相应的应用案例分析,以帮助读者应用系统工程的理论、方法去解决实际问题;适量增加了习题;删除了原版第13章系统模拟的内容;修改了原版中存在的错误。补充的内容有:第1章在阐述系统和系统工程概念的基础上,增加了对系统工程发展趋势的分析;第2章增加了对系统的模糊综合评价、企业库存问题的系统分析;第3章增加了转运问题、线性规划模型在柔性制造系统评价中的应用等内容;第4章阐述整数规划模型及其应用;第5章在阐述目标规划模型、算法的基础上增加了目标规划在升级调资、产品分销决策中的应用分析;第6章增加了动态规划在公交车调度中的应用案例;第7章增加了带某些约束条件的多种物资联合订购的存储模型、存储模型应用案例分析等内容;第8章增加了图论在输电网络设计、配置中的应用;第9章增加了排队论在教务员岗位数量确定、露天矿开采中的应用案例分析;第10章增加了矩阵对策的策略分析、矩阵对策在产品构成、城市污水处理费用分摊等问题中的应用分析;第11章增加了对效用理论的阐述,并分析了效用理论在系统效能决策中的应用;第12章加强了现代预测方法的论述,给出了预测的应用分析。同时,为使叙述更为严谨统一,对个别词语进行了改动。

参加本书第2版修订的有杜瑞成教授、闫秀霞教授、程钧谟教授、李霞副教授、王侃昌副教授、高建中副教授。

系统工程是一门不断发展的新兴交叉学科,涉及的知识深厚而广泛,应用领域众多。本书内容尽管在多年教学实践和科学研究中力求不断更新、充实和完善,但限于编者的知识水平,书中不妥或错漏之处仍在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

## 第1版前言

系统工程在大学中已经成为许多专业学生选修重要课程。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学生、科技工作者以及各行各业管理工作者的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学生和一般管理工作者，预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，前两章主要介绍了系统的概念和系统理论，后11章介绍了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者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，前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的一部分。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中不妥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

## 第2版前言

## 第1版前言

## 第1章 系统与系统工程 ..... 1

### 1.1 系统概述 ..... 1

### 1.2 系统工程及其发展趋势 ..... 5

### 1.3 系统工程的方法与步骤 ..... 12

### 复习思考题 ..... 14

## 第2章 系统分析与评价 ..... 15

### 2.1 系统分析概述 ..... 15

### 2.2 系统的模型化 ..... 19

### 2.3 系统分析实例——企业库存问题的系统分析 ..... 22

### 2.4 系统评价 ..... 25

### 复习思考题 ..... 32

## 第3章 线性规划 ..... 33

### 3.1 线性规划问题及其数学模型 ..... 33

### 3.2 线性规划问题的图解法 ..... 36

### 3.3 线性规划问题的标准形式及其解的概念 ..... 37

### 3.4 单纯形法 ..... 39

### 3.5 改进单纯形法 ..... 49

### 3.6 对偶单纯形法 ..... 55

### 3.7 灵敏度分析 ..... 65

### 3.8 运输问题 ..... 72

### 3.9 线性规划模型在柔性制造系统评价中的应用 ..... 91

### 复习思考题 ..... 96

## 第4章 整数规划 ..... 99

### 4.1 分枝定界法 ..... 99

### 4.2 0-1型整数规划的隐枚举法 ..... 101

### 4.3 指派问题及其解法 ..... 102

### 复习思考题 ..... 114

## 第5章 目标规划 ..... 116

### 5.1 目标规划数学模型的建立 ..... 116

### 5.2 目标规划的图解法 ..... 123

### 5.3 目标规划的分层单纯形法 ..... 124

### 5.4 目标规划应用案例 ..... 126

### 复习思考题 ..... 132

## 第6章 动态规划 ..... 134

### 6.1 动态规划的基本原理和基本方程 ..... 134

### 6.2 机器负荷分配问题 ..... 138

### 6.3 资源分配问题 ..... 142

### 6.4 背包问题 ..... 146

### 6.5 多阶段生产安排问题 ..... 147

### 6.6 生产与存储问题 ..... 148

### 6.7 连续型动态规划问题 ..... 150

### 6.8 案例分析——动态规划在公交车调度中的应用 ..... 152

### 复习思考题 ..... 156

## 第7章 存储论 ..... 157

### 7.1 存储论的基本概念 ..... 157

### 7.2 确定型存储模型 ..... 159

### 7.3 随机性存储模型 ..... 169

### 7.4 带某些约束条件的多种物资联合订购的存储模型 ..... 172

### 7.5 应用案例——戴尔的库存管理 ..... 174

### 复习思考题 ..... 176

## 第8章 图与网络分析 ..... 178

### 8.1 图和网络的基本概念 ..... 178

### 8.2 树 ..... 183

### 8.3 最短路问题 ..... 186

### 8.4 网络最大流问题 ..... 190

|                           |     |                              |     |
|---------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 8.5 最小费用最大流问题 .....       | 195 | 第 11 章 决策分析 .....            | 278 |
| 8.6 中国邮路问题 .....          | 200 | 11.1 决策、决策分析及其基本要素 .....     | 278 |
| 8.7 网络计划技术 .....          | 203 | 11.2 确定型决策 .....             | 280 |
| 8.8 应用案例 .....            | 215 | 11.3 随机型决策 .....             | 280 |
| 复习思考题 .....               | 216 | 11.4 不确定型决策 .....            | 285 |
| <b>第 9 章 排队论</b> .....    | 219 | 11.5 灵敏度分析 .....             | 288 |
| 9.1 排队论概述 .....           | 219 | 11.6 情报的价值和贝叶斯决策 .....       | 289 |
| 9.2 排队系统的组成及数量指标 .....    | 221 | 11.7 效用理论及其在系统效能决策中的应用 ..... | 291 |
| 9.3 到达间隔的分布和服务时间的分布 ..... | 224 | 复习思考题 .....                  | 296 |
| 9.4 排队系统的数学模型 .....       | 229 | <b>第 12 章 预测技术</b> .....     | 298 |
| 9.5 经济分析——系统的最优化 .....    | 242 | 12.1 预测概述 .....              | 298 |
| 9.6 排队论应用案例 .....         | 246 | 12.2 定性预测技术 .....            | 299 |
| 复习思考题 .....               | 251 | 12.3 因果关系预测方法 .....          | 301 |
| <b>第 10 章 对策论</b> .....   | 253 | 12.4 平滑预测技术 .....            | 308 |
| 10.1 对策模型的构成及分类 .....     | 253 | 12.5 马尔柯夫链分析法预测 .....        | 314 |
| 10.2 矩阵对策的基本定理 .....      | 257 | 12.6 预测中的数据处理与结果评判 .....     | 320 |
| 10.3 解矩阵对策的线性规划方法 .....   | 265 | 复习思考题 .....                  | 326 |
| 10.4 合作对策与效益分配 .....      | 268 | <b>附录</b> .....              | 329 |
| 10.5 对策论应用案例 .....        | 272 | <b>参考文献</b> .....            | 335 |
| 复习思考题 .....               | 276 |                              |     |

# 第1章 系统与系统工程

## 1.1 系统概述

### 1.1.1 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。在西汉时期，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节气。在北魏时期，著名学者贾思勰在其名著《齐民要术》一书中，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。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，在运筹学和其他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”。

### 1.1.2 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。可以说系统无处不在，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。

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,但其含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。

### 1.1.3 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、血压以及其他参数，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。

#### 1.1.4 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， $1+1 > 2$ 。如“一个巧臭皮匠，没张好鞋样；两个笨臭皮匠，彼此有商量；三个臭皮匠，顶个诸葛亮”。

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，虽然每个单元的功能是良好的，但单元步调不一，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，虽然每个单元的功能并不很完善，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单元功能之和。

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，所有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，例如按所提供最终产品的不同可以将工业系统分为采掘业、加工业、制造业等，依次

类推，可以有按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绝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，其有序结构层次如图 1-1 所示。

作为企业系统，内部的生产、销售、财务、人力资源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，生产部门就不可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部门、人力资源管理部门的支持。

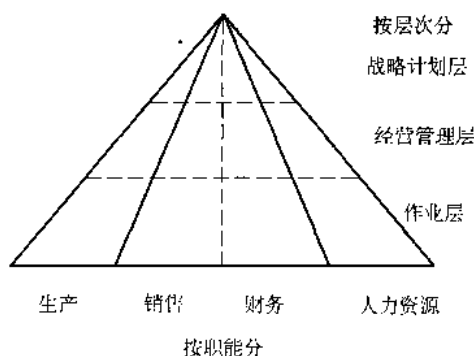


图 1-1 企业系统结构层次

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、产品需求、原材料供应商、国家宏观政策等）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。

### 1.1.5 系统的结构与功能

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，系统的结构可以用下式表示：

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

式中  $S$ ——系统；

$\Omega$ ——元素的集合；

$R$ ——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。

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。所以，系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。

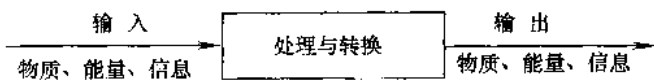


图 1-2 系统的功能

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，即  $1+1>2$ ，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能有系统功能或总体效果的最优，即  $1+1<2$ 。这里还有一个协调的问题，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。

## 1.2 系统工程及其发展趋势

### 1.2.1 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一定的线索。

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 系统工程与其他工程学的不同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》中的定义是 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. 我国著名学者钱学森认为 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. 我国的学者林延江认为 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、电子计算机和其他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、运用等项工作所采用的思想、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,而且也要用到其他工程技术,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、综合和内在联系,是指导和协调各专业学科的桥梁,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,往往是利用组成单元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单元所必须的性能,并利用各单元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,认为从应用实践到基础理论,现代科学技术可以分为4个层次:首先是工程技术这一层次,然后是直接为工程技术做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,存储论,图论与网络技术,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,也必将

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,另一个重要的理论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,涉及的变量成千上万,要从许许多多的方案中选优,没有电子计算机是不可能实现的。

### 1.2.2 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 3 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。20 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,研究科学管理的规律,到 20 世纪 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。20 世纪 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工程学的理论基础,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 20 世纪 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 方法已成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。20 世纪 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,人们采用分解和协调的方法解决具有多级逆阶控制结构的复杂的大系统问题。

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 20 世纪 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，在导弹等现代化技术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。

### 1.2.3 系统工程的发展趋势

21世纪，科学技术蓬勃发展，人们开始利用各种方法来处理在非线性相互作用下的开放系统，它在特定的条件下会发生混沌现象。这样，系统长期的运动状态就变成不可预测的，在一定程度上是一种无序的状态。同时，这种系统在混沌区的附近还可能突然形成具有特定的时间结构，即分形，这样又出现了由无序向有序的转变。在现实世界中，到处都可以观察到具有混沌和分形现象的系统，如经济系统、社会系统、生物圈系统、人体系统等，科学家把这类系统称为复杂系统。

对于复杂系统的研究，经典科学吸收了系统论、进化论、理性论和人文精神的思想，将定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、还原论与整体论相结合、科学推理与哲学思辨相结合，采用不确定条件下的决策技术、综合集成技术、整体优化技术、计算智能、非线性科学、数理逻辑、计算机模拟以及微分方程和形式逻辑等工具研究复杂科学，复杂科学是21世纪系统工程的发展趋势。

复杂自适应系统（Complex Adaptive System，简称CAS）理论是复杂科学研究中的热门课题，近几年取得了相对成熟的理论成果。但不同的学者所进行的CAS研究，其理论框架并不相同。

在几种有代表性的CAS理论中，为学术界所公认，如提出“CAS”概念并建立了比较成熟理论的SFI指导委员会主席之一、遗传算法的发明人约翰·H·霍兰（John Holland）。1994年，在SFI成立10周年所举行的乌拉姆系列讲座的首次报告会上，霍兰提出了关于CAS的比较完整的理论。另一位是因发现夸克而获得诺贝尔奖的盖尔曼（M·gell-Mann），他作为SFI的创始人，也提出了有别于霍兰的CAS理论。英国学者拉尔夫·斯泰西（Ralph·Stacey）为了将复杂性科学的理论观念“映射”到组织行为和管理中去，也较详细地阐述了CAS理论，从而提供了一种用复杂性科学方法来审视组织管理的全新理念。

1. CAS理论的核心观念 所谓复杂适应系统，是指由大量的按一定规则或模式进行非线性相互作用的行为主体所组成的动态系统。行为主体通过“学习”产生适应性生存和发展策略，导致CAS进行创造性演化。复杂适应系统有别于一般系统和复杂系统，关键在“适应”。

（1）CAS理论的核心思想——适应性 就复杂性而言，霍兰在《隐秩序》一书的序言中指出：“本书讨论的中心议题，是近年来备受关注的领域：复杂性。……在写这本书的过程中，我把重点放在复杂性的一个侧面——围绕‘复杂适应系统’研究”。正因如此，霍兰把“适应性造就复杂性”作为《隐秩序》一书的附标题，突出了其CAS理论的核心思想。当然，造成复杂性的因素可能是多方面的，所以霍兰强调适应性仅仅是造成复杂性的1个“侧面”，即适应性仅是产生复杂性的机制之一，然而由适应性产生的复杂性，即所谓CAS确实是普遍存在而又十分重要的复杂系统，对它们缺乏研究会“极大地阻碍我们去解决当今世界存在的一些重大问题”。基于此，CAS理论无疑是复杂系统研究中的一个重要理论。

(2) CAS 理论的核心概念——适应性主体或行为主体 既然适应性造就复杂性,在复杂适应系统中“适应性”自然是一个核心概念。所谓适应,就是个体与环境之间的主动的、反复的交互作用。霍兰将生物学中适应性术语的范围扩大,把学习与相关过程也包括进来。

任何系统,包括 CAS 都是由大量元素组成的,霍兰认为它们应该是主动的元素 (Active Element),于是借用了经济学中的主体 (Agent) 一词,斯泰西则用“行为主体”概念。

从元素到主体,并不仅仅是一个简单的名称变换,而是在观念上有明显的突破性。主体概念加上适应性概念成为“适应性主体”或“行为主体”,把 CAS 组成单元的个体的主动性提高到了复杂性产生的机制和复杂系统进化的基本动因的重要位置。“在 CAS 中,任何特定的适应性主体所处环境的主要部分,都由其他适应性主体组成,所以任何主体在适应上所作的努力,就是要去适应别的适应性主体”。因此,主体与主体之间的相互作用、相互适应成为 CAS 生成复杂动态模式的主要根源。

2. CAS 的演化理论 CAS 理论研究的主要目的在于探讨 CAS 的演化过程、演化性质和演化机理。

(1) CAS 演化的基本过程——混沌边缘突现隐秩序 首先,只有当系统处于混沌边缘,才进入敏感相变区。所谓混沌边缘,指一个 CAS 运行在有序和无序之间的相变过程中出现的有界不稳定性的一种形态。这就是说,只有当行为主体运行在既稳定又不稳定的空间时,系统方能不断地产生变异和新奇,故混沌边缘也可称之为创造性空间。

其次,混沌边缘突现隐秩序,是指系统并不是按事先特意设计的程序去产生新的秩序,而是 CAS 在系统运行中,通过一种内在的自组织过程,产生一种动力学行为,突现秩序,这就是所谓隐秩序。换言之,在混沌边缘,行为主体间进行的交互作用会产生任何行为主体都没有事先预料到的模式。突现事件本身就意味着既不可能预见行为主体间交互作用产生的总体输出,也不可能从总模式中推导出行为主体的行为。

第三,其内在运作情形是隐性模式与显性模式的辩证运动过程。任何 CAS 都是由大量的按一定模式进行非线性相互作用的行为主体组成的动态系统。行为主体的模式有个体模式和共享模式、显性模式和隐性模式之分。显性模式是规范行为主体或系统对当前基本任务的认识并驱使其实现的一系列规则或符号系统,显性模式主要执行系统中合法的任务(故称合法系统),它导致行为主体表现为统一、服从与重复的行为。因此,受显性模式驱使的合法系统使系统趋于统一。隐性模式是指系统中不是用来构成驱使完成其当前基本任务的那部分规则或符号系统。行为主体在合法系统中相互作用时,往往通过非正式渠道而建立起另一种网络,它们作为合法系统的影子(故称影子系统),其主体相互作用产生各自的规则,这些规则实质上并不执行系统当下的主要任务,因而称为隐性模式。受隐性模式驱使的影子系统使系统趋于多样化。系统的共同演化过程是隐性模式破坏显性模式以产生突现结果的自组织创新和重构过程。

(2) CAS 演化的内在动力——不稳定源与稳定源的辩证运动 处于混沌边缘的 CAS 存在 3 种不稳定源和 3 种稳定源。

3 种不稳定源为:

1) 初值敏感性:当 CAS 运行在混沌边缘时,环境的微小变化都能被正反馈放大到足以使系统的演化过程发生巨大变化的程度。

2) 竞争:共同演化的系统之间存在相互竞争,它们使系统不可能处于某种形式的平衡



态。竞争的动力学具有破坏稳定的本质，另外，交叉复制也部分地具有竞争性。

3) 隐性模式带来的创新张力：系统的隐性模式总试图替代维持系统当前稳定的显性模式，这种具有相反任务的两个模式之间的对立，也激发了系统的学习过程。

3 种稳定源为：

1) 抑制：由于系统内存在的负反馈和定型化，使系统有一种内在的抑制力，它基本上能够使系统不对微小的变化作出过于敏感的反应。

2) 合作：合作的稳定力量主要来源于系统内在的自组织能力，即系统通过合作和学习来适应环境的变化。另外竞争的动力学虽主要起破坏稳定的作用，但它也能给系统带来稳定，因为行为主体为了在竞争中生存下来，可能改进它们的合作策略，使每个个体的生存建立在其他个体的生存之上，这就是定型化或者锁定。

3) 显性模式对新张力的规避：CAS 存在着自适应的危险性。当行为主体已经具有很高的适应性，其操作模式十分有效时，即当显性模式遇不到任何挑战时，复杂学习这种功能就会退化，原先的一种学习行为就会变成一种直觉反应，从而退化成为一种技能行为，排除在主体的“意识”之外。因此，学习过程的一些缺陷也可以给系统带来稳定。

3 种稳定源和 3 种不稳定源构成了 CAS 的矛盾运动。稳定与不稳定、竞争与合作、显性模式与隐性模式、变化与不变化之间矛盾的辩证统一是推动 CAS 演化发展的动力。正是这种辩证地运动过程，不断地打破和重新确定系统中稳定和不稳定的矛盾平衡状态，防止系统被禁锢在局部和暂时的最优状态，从而使系统处在不断地发展变化之中。

(3) CAS 演化的基本性质——关于因果性和预测性 复杂系统的行为在某些方面是可预测的，在另一些方面是不可预测的，在一些事件中，因果关系可能是明晰可辨的，而在另一些事件中，因果关系链条很可能在复杂的相互作用中出现断裂。

一般来说，CAS 的总体形式、总类特征是可以预测的。比如，一旦人们知道了系统控制参数的条件，就能够预测它的动力学，解释其发生的原因，也能够进行预测。然而，其具体形式是无法预测的，因为系统总是可能出现意想不到的新奇形式，这正是系统创新的基础。必须指出，这种预测不是建立在因果分析之上的，而是建立在特定类型模式的重复出现的经验基础之上的。因此，预测一般有两种，一种预测需要知道因果关系，它主要依靠分析推理能力；而另一种预测需要依靠模式识别，即类比和知觉推理能力。

### 3. CAS 理论研究的基本方法

(1) 隐喻 霍兰认为，隐喻在复杂适应系统研究中起关键作用，丰富的隐喻和类比，是创造性科学的核心。所谓隐喻，是将一些差别较大的经验领域融合成一个单一的形象或符号，通过想象和象征直观地理解不同经历、不同背景的个体对象。霍兰对隐喻方法作了极高评价，他指出：“自泰勒斯开始，我们沿着演绎、符号数学和科学理论的方向走过了漫长的道路。然而，这些方法对激发创造性过程的隐喻想象增加了约束。”他主张：“真正综合两种传统——欧美科学的逻辑、数学方法与中国传统的隐喻类比相结合——可能会有效地打破现存的两种传统截然分离的种种限制。在人类历史上，我们正面临着复杂问题的研究，综合两种传统或许能够使我们做得更好。”

(2) 计算机技术 SFI 研究工作的一大特点是高度重视应用计算机技术来研究复杂性问题。一方面，他们确实进行了一些开创性工作，在许多问题上取得了一些进展，这种科学研究的现代手段和方法值得借鉴。但另一方面，既然还原论方法解决不了复杂性问题的，那么仅