

普通高等教育“十二五”规划教材

# 系统工程

刘军 张方风 朱杰 编

Systems Engineering

普通高等教育“十三五”规划教材

# 系统工程

刘军 张方风 朱杰 编



机械工业出版社

本书介绍了系统工程的基本理论和方法,以建立系统思维为主旨,将基本概念、基本理论和基本方法的阐述作为重点,归纳整理和引用了国内外学者许多最新研究成果,在每章后给出了相关的选读材料,供读者进一步加深理解。通过阅读本书,可以帮助读者掌握系统工程的基本概念、基本方法和技术,逐步具有应用系统工程思想解决实际问题的能力。

本书适合管理类、经济类、信息类专业高年级本科生和硕士研究生作为教材使用,同时也可供教学人员、管理人员和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

系统工程/刘军,张方风,朱杰编.—北京:机械工业出版社,2014.9  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-47390-9

I. ①系… II. ①刘…②张…③朱 III. ①系统工程—高等学校—教材  
IV. ①N945

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第159926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:曹俊玲 责任编辑:曹俊玲 刘静 冯铎  
版式设计:赵颖喆 责任校对:黄兴伟  
封面设计:张静 责任印制:杨曦  
涿州市京南印刷厂印刷

2014年9月第1版第1次印刷  
184mm×260mm·14.75印张·354千字

标准书号:ISBN 978-7-111-47390-9

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着社会经济的快速发展，在工农业生产、社会经济活动、科学研究等领域出现的系统性、复杂性问题日益普遍。面对复杂的现实环境，更新思维习惯，从新的视角思考问题、研究问题，用新的方法解决问题，显得尤为重要。系统工程是 20 世纪中期产生并迅速发展起来的综合应用方法与技术，它是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、实验和使用的科学方法，强调实践中使用系统思想作指导，以系统整体最优为目标，运用系统论的方法研究和解决实际问题。系统工程的思想、理论、方法与技术已经广泛应用于军事、社会、经济等各个领域，并逐步成为人们认识世界、改造主客观世界的有力武器。

系统工程是理工类、管理类、经济类、信息类等各专业大学生、研究生的一门重要的基础性课程。通过该课程的学习，使学习者能够逐步树立系统的思想，掌握系统工程方法论及相关技术，增强分析、研究和解决复杂现实问题的能力。

本书从系统和系统工程概念开始，按照系统工程方法论的逻辑思维过程，介绍了系统工程的基本理论和方法，以建立系统思维为主旨，将基本概念、基本理论和基本方法的阐述作为重点，引导读者通过学习相关理论、方法与技术，逐步养成从整体角度考虑解决实际系统问题的思维习惯。本书的主要内容包括：系统工程方法论，系统模型与仿真，系统分析，系统评价，系统决策与系统预测等。本书强调理论体系的完整，注意系统思想的学习，避开了繁杂的数学推导，力求使内容适合更多专业大学生和研究生作为教材或参考书使用。为了拓展学习者的视野，满足研究型学习的需求，每章后给出了目前具有系统性思想的最新行业发展与应用的文献材料，供读者选读。

本书由刘军、张方风、朱杰编写，刘军、朱杰负责全书的框架设计以及内容的校审，张方风负责资料的归纳整理和内容编撰。研究生陈伊菲、卫小蕊、王璐超、杨化云、姜天、宋国平、杨超、安亚文等参加了资料的收集和整理工作。本书参考和引用了大量国内外学者的研究成果，资料来源列于书末的参考文献，在此对这些作者表示敬意和感谢！

本书的出版得到北京高校物流技术工程研究中心项目资助。由于编者的水平有限，书中难免出现错漏，敬请读者和专家学者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 系统与系统工程</b> .....	1	<b>2.2 系统论基础</b> .....	27
1.1 系统的概念 .....	1	2.2.1 系统的观点 .....	28
1.1.1 系统的定义 .....	1	2.2.2 系统的环境、行为和功能 .....	30
1.1.2 系统的属性 .....	2	2.2.3 系统的状态及其演化 .....	31
1.2 系统的分类 .....	4	2.2.4 系统论的方法 .....	32
1.2.1 按照系统的属性进行分类 .....	4	<b>2.3 控制论基础</b> .....	34
1.2.2 按照系统与环境的关系进行分类 .....	4	2.3.1 控制论的发展 .....	34
1.2.3 按照组成系统的实际内容进行 分类 .....	4	2.3.2 控制论的基本概念 .....	35
1.2.4 按照系统内各子系统之间的相互 关系进行分类 .....	5	2.3.3 控制系统及其分类 .....	37
1.2.5 按照系统状态与时间的关系 进行分类 .....	5	2.3.4 控制系统的主要方法 .....	39
1.2.6 按照系统的演化特点进行分类 .....	5	2.3.5 基本控制规律 .....	39
1.2.7 按照系统结构的复杂程度进行 分类 .....	5	2.3.6 控制论的应用 .....	41
1.3 系统的结构与功能 .....	6	<b>2.4 信息论基础</b> .....	42
1.3.1 系统的结构 .....	6	2.4.1 信息论的发展 .....	42
1.3.2 系统的功能 .....	7	2.4.2 信息论的基本概念 .....	43
1.4 系统思想的发展与系统科学 .....	8	2.4.3 信息方法与技术 .....	46
1.5 系统工程的发展和定义 .....	10	2.4.4 信息论的应用 .....	47
1.5.1 系统工程的产生和发展 .....	10	<b>2.5 运筹学基础</b> .....	48
1.5.2 系统工程的定义 .....	12	2.5.1 运筹学的发展 .....	48
1.6 系统工程的研究对象和技术 .....	13	2.5.2 运筹学的基本概念 .....	49
1.7 系统工程的理论体系 .....	15	2.5.3 运筹学的主要内容 .....	50
1.8 系统工程的应用与展望 .....	16	2.5.4 运筹学解决问题的步骤 .....	55
1.8.1 系统工程的应用领域 .....	16	<b>2.6 复杂系统理论</b> .....	55
1.8.2 系统工程的发展趋势 .....	18	2.6.1 复杂系统概述 .....	56
本章关键词 .....	19	2.6.2 自组织理论 .....	59
本章小结 .....	19	2.6.3 协同学 .....	61
选读材料 物流系统工程 .....	20	2.6.4 复杂适应系统理论 .....	63
思考题 .....	25	本章关键词 .....	65
<b>第 2 章 系统工程基本理论</b> .....	27	本章小结 .....	65
2.1 概述 .....	27	选读材料 复杂网络理论 .....	66
		思考题 .....	73
		<b>第 3 章 系统工程方法论</b> .....	74
		3.1 概述 .....	74
		3.2 霍尔方法论 .....	76

3.2.1 时间维(粗结构) .....	76	4.5 系统仿真技术 .....	114
3.2.2 逻辑维(细结构) .....	77	4.5.1 计算机仿真技术 .....	114
3.2.3 专业维(知识维) .....	78	4.5.2 连续系统和离散系统仿真 .....	115
3.3 软系统方法论 .....	79	4.5.3 分布式交互仿真 .....	116
3.3.1 软系统方法论的提出 .....	79	4.5.4 Multi-agent 系统仿真 .....	118
3.3.2 硬系统方法论的局限性 .....	80	4.5.5 基于系统动力学的仿真 .....	120
3.3.3 软系统方法论的应用 .....	80	本章关键词 .....	120
3.4 综合集成方法论 .....	82	本章小结 .....	120
3.4.1 综合集成方法论的提出 .....	82	选读材料 虚拟现实技术 .....	121
3.4.2 综合集成方法的主要观点 .....	83	思考题 .....	128
3.4.3 综合集成方法的特点 .....	84	<b>第5章 系统分析</b> .....	129
3.4.4 综合集成研讨厅体系 .....	85	5.1 概述 .....	129
3.5 物理—事理—人理方法论 .....	86	5.1.1 系统分析的定义 .....	129
3.5.1 物理—事理—人理方法论的提出 .....	86	5.1.2 系统分析的意义 .....	130
3.5.2 物理—事理—人理方法的主要 步骤 .....	87	5.1.3 系统分析的原则 .....	131
3.5.3 物理—事理—人理方法论的特点 .....	88	5.1.4 系统分析的要素和内容 .....	132
3.5.4 物理—事理—人理方法论的应用 原则 .....	88	5.1.5 系统分析的步骤 .....	134
本章关键词 .....	89	5.1.6 系统分析的方法 .....	136
本章小结 .....	89	5.2 系统目标分析 .....	137
选读材料 基于构件的软件开发方法 .....	90	5.2.1 目的、目标及其属性 .....	137
思考题 .....	98	5.2.2 系统目标分析的意义 .....	138
<b>第4章 系统模型与仿真</b> .....	99	5.2.3 系统目标的分类 .....	139
4.1 概述 .....	99	5.2.4 系统目标的建立 .....	140
4.1.1 系统模型概述 .....	99	5.2.5 目标冲突与协调 .....	141
4.1.2 系统仿真概述 .....	100	5.3 系统环境分析 .....	142
4.2 系统模型的作用、分类方法和体系 .....	101	5.3.1 系统环境的概念 .....	142
4.2.1 系统模型的作用 .....	101	5.3.2 系统环境分析的意义 .....	142
4.2.2 系统模型分类方法 .....	101	5.3.3 环境因素的分类 .....	143
4.2.3 模型库与模型体系 .....	103	5.3.4 环境因素的确定与评价 .....	145
4.3 系统模型的构建 .....	103	5.4 系统结构分析 .....	146
4.3.1 系统建模的原则 .....	104	5.4.1 系统结构的概念 .....	146
4.3.2 系统建模的方法及步骤 .....	104	5.4.2 系统要素集的分析 .....	146
4.3.3 常用的系统模型 .....	106	5.4.3 系统相关性分析 .....	147
4.4 系统仿真基础知识 .....	109	5.4.4 系统阶层性分析 .....	147
4.4.1 系统仿真的分类 .....	109	5.4.5 系统整体性分析 .....	148
4.4.2 系统仿真的特点 .....	110	5.5 系统可行性分析 .....	148
4.4.3 系统仿真的发展历史和趋势 .....	111	5.5.1 可行性分析的基本概念 .....	149
4.4.4 系统仿真的步骤 .....	113	5.5.2 可行性分析的作用 .....	149
		5.5.3 可行性分析在项目开发周期 中的地位 .....	149

5.5.4 可行性分析的基本内容	150	本章关键词	181
5.6 系统可靠性分析	152	本章小结	181
5.6.1 系统可靠性的含义	152	选读材料 供应链一体化管理	181
5.6.2 系统可靠性指标	153	思考题	185
5.6.3 可靠性指标体系	153	<b>第7章 系统决策</b>	186
5.6.4 提高系统可靠性的方法	155	7.1 概述	186
本章关键词	155	7.1.1 决策的阶段	186
本章小结	155	7.1.2 决策的原则	187
选读材料 项目可行性分析	156	7.2 决策论	187
思考题	162	7.2.1 决策模型的组成要素	187
<b>第6章 系统评价</b>	163	7.2.2 决策模型的表示方法	188
6.1 概述	163	7.2.3 决策问题的分类	188
6.1.1 系统评价的基本概念	163	7.3 决策树	189
6.1.2 系统评价的复杂性和关注点	164	7.3.1 决策树的结构	189
6.1.3 系统评价、系统分析以及系统决策的关系	165	7.3.2 单阶段决策	190
6.1.4 系统评价的思想与原则	165	7.3.3 多阶段决策	191
6.1.5 系统评价的内容	166	7.4 风险型决策和不确定型决策	193
6.1.6 系统评价的步骤	167	7.4.1 风险型决策	193
6.1.7 系统评价指标体系	167	7.4.2 不确定型决策	194
6.2 系统评价的理论和方法	169	本章关键词	196
6.2.1 评价理论	169	本章小结	196
6.2.2 评价方法	170	选读材料 物联网技术与发展	197
6.3 费用—效益分析	172	思考题	202
6.3.1 费用—效益分析的基本概念	172	<b>第8章 系统预测</b>	203
6.3.2 费用—效益分析的基本原理	173	8.1 概述	203
6.3.3 费用—效益分析法的特点	173	8.1.1 系统预测的概念	203
6.3.4 费用和效益的关系	174	8.1.2 系统预测的步骤	204
6.3.5 费用和效益的估算方法	174	8.2 定性预测	205
6.3.6 费用—效益分析的评价基准	175	8.2.1 定性预测概述	205
6.4 层次分析法	176	8.2.2 德尔菲法	206
6.4.1 层次分析法原理	176	8.2.3 主观概率法	207
6.4.2 层次结构模型	177	8.2.4 交叉概率法	207
6.4.3 判断矩阵	177	8.3 定量预测	208
6.4.4 层次单排序	177	8.4 时间序列分析预测	208
6.4.5 一致性检验	178	8.4.1 时间序列的概念	208
6.4.6 层次总排序	179	8.4.2 时间序列预测的概念	209
6.5 模糊评价法	179	8.4.3 时间序列的分解	209
6.5.1 模糊的概念及度量	179	8.4.4 随机性时间序列预测	210
6.5.2 模糊综合评价	180	8.4.5 确定性时间序列预测	210
		8.5 灰色预测	212

8.5.1 灰色预测概述.....	212	本章关键词 .....	215
8.5.2 GM 模型的机理 .....	213	本章小结 .....	215
8.5.3 GM (1, 1) 模型的建立 .....	213	选读材料 备件库存管理 .....	217
8.5.4 数列预测.....	214	思考题 .....	224
8.5.5 灾变预测.....	215	<b>参考文献</b> .....	225



# 第 1 章 系统与系统工程

20 世纪，由于生产力的巨大发展，出现了许多大型复杂的工程技术和社会经济问题，它们都以系统的形式出现，都要求从整体上加以优化解决。受这种社会需求的推动，第二次世界大战后，出现了一个“学科群”。随着科学形态系统思想的涌现，横跨自然科学、社会科学和工程技术，从系统的结构和功能角度研究客观世界的系统科学应运而生。其中，面向解决实际问题的系统工程理论与方法占据了重要的科学领地。经过各个领域的专家、学者几十年的不断探索、发展和完善，系统工程已经成为研究、分析和处理复杂系统问题的最有效的理论、方法和工具。

## 1.1 系统的概念

系统是系统工程研究的对象。早在古希腊时期，一些哲学家就已经使用了这一概念。“Syn-histanai”一词原意是指事物中共性部分和每一事物应占据的位置，也就是部分组成的整体的意思。系统的拉丁语 Systema 是表示群、集合等意义的抽象名词，其英文 System 在中文里则对应了多种解释，如体系、制度、机构等。很多对象可以被看作系统，它是事物存在的认识方式之一。例如，研究物流系统时，仓储系统、配送网络、供应链网络可以看作系统；研究信息系统时，人、计算机硬件设备、计算机软件、计算机网络等可以看作系统；在研究社会问题时，企业、家庭、工厂、学校等也都可以作为系统来看待。

### 1.1.1 系统的定义

系统的概念来源于人类的长期社会实践。早在 1886 年，恩格斯就曾在《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》一文中指出：“一个伟大的基本思想，即认为世界不是一成不变的事物集合体，而是过程的集合体。”他谈到的“过程”是指系统中各个部分、要素相互作用及整体、系统的发展变化。“集合”已指出了系统的哲学概念。系统概念、系统思想在马克思著作中也曾作过多次表述，在马克思主义的唯物主义辩证法说明联系的多样性中的整体部分联系中曾有过论述。但是，系统这一概念的广泛应用以及对其含义的逐步具体化，应该说是在 20 世纪 40 年代以后才开始发展起来的。

系统的定义依照学科的不同、待解决问题的不同及使用方法的的不同而有所区别，国内外关于系统的定义有很多种，如：

(1) 美国的《韦氏 (Webster) 大辞典》中，“系统”被解释为“有组织的或被组织化的整体；结合着的整体所形成的各种概念和原理的结合；由有规则的相互作用、相互依赖的形式组成的诸要素集合”。

(2) 日本的日本工业标准 (Japanese Industrial Standards, JIS) 中，“系统”被定义为“许多组成要素保持有机的秩序向同一目的行动的集合体”。

(3) 《苏联大百科全书》中，“系统”是指“一些在相互关联与联系之下的要素组成的

集合，形成了一定的整体性、统一性”。

(4) 中国的《中国大百科全书·自动控制与系统工程》中，“系统”是指“由相互制约、相互作用的一些部分组成的具有某种功能的有机整体”。

(5) 仅就系统自身的规定性看，按照现代系统研究开创者贝塔朗菲（Bertalanffy）的定义，系统（Systems）是“相互作用的多元素的复合体”。精确地讲，如果一个对象集中至少有两个可以区分的对象，所有对象按照可以辨认的特有方式相互联系在一起，就称该集合为一个系统。

(6) 钱学森院士在回顾我国研制“两弹一星”的工作经历时说：“我们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的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。”

撇开系统的具体形态和性质，可以发现，一切系统均具有以下共同点：

首先，系统由多个要素（或元素）构成，构成系统的要素可以是单个事物，也可以是一群事物的集合体。其次，系统的内部与外部要有一定的秩序。也就是说，它的各要素之间、要素与整体之间，以及整体与环境之间，都存在着一定的有机联系。最后，系统的整体要具有不同于各个组成要素的结构和功能。如果只是一些元素的简单堆积或重叠，则认为它们不能构成系统。

从以上要点出发，可以给出以下定义：系统是由一些元素（要素）通过相互作用、相互关联、相互制约而组成的具有一定功能的整体。

### 1.1.2 系统的属性

在理解系统定义时，要注意系统的以下几个方面的属性：

#### 1. 整体性

系统是作为一个整体出现的，具有独立功能的系统要素以及要素间的相互关系（相关性、阶层性）根据逻辑统一性的要求，协调存在于系统之中。即任何一个要素不能离开整体去研究，要素间的联系和作用也不能脱离整体的协调去考虑。系统不是各个要素的简单集合，否则它就不会具有作为整体的特定功能。脱离了整体性，要素的机能和要素间的作用便失去了原有的意义，研究任何事物的单独部分不能得出有关整体性的结论。系统的构成要素和要素的机能、要素的相互联系要服从系统整体的目的和功能，在整体功能的基础上展开活动，这种活动的总和形成系统整体的有机行为。在一个系统整体中，即使每个要素并不十分完善，但它们可以协调、综合成为具有良好功能的系统。反之，即使每个要素都是良好的，但作为整体却不具备某种良好的功能，也不能称之为完善的系统。

#### 2. 集合性

集合性表明系统是由许多（至少两个）可以相互区分的要素组成。这些要素可以是具体的物质，也可以是抽象的或非物质的软件、组织等。例如，一个计算机系统，一般都是由计算器、存储器、输入输出设备等硬件组成，同时，还包含有操作系统、编程软件、数据库等软件，从而形成一个完整的集合。

#### 3. 层次性

作为一个相互作用的诸要素的总体，系统可以分解为一系列子系统，有些子系统仍可以继续划分为更小的子系统，而系统本身可能是某个更大系统的子系统。所以，系统具有层次

性，这是系统结构的重要特征。通常，人们判断一个系统的复杂程度，不是依据它所包含的组分数目，而是由它所具有的层次多少而决定的。一个系统包含的层次越多，这个系统就越复杂。子系统及子系统间关联方式的总和称为系统的层次结构。关联方式主要是因果关联（数学和逻辑关系），表现形式有树状结构和网状结构两种。

系统的各层次之间存在着紧密的联系，在系统层次结构中表征了在不同层次子系统之间的从属关系或相互作用的关系。在不同的层次结构存在着动态的信息流和物质流，构成了系统的运动特性。但是，这一层次的性质并不是由下一层次的性质简单加总得出的。一个复杂系统在由低层次的要素组成高层次的过程中，系统往往产生出新的、原来层次所没有的性质，这个过程在系统科学里被称为“涌现”（Emergence）。涌现现象在诸多学科领域中都有体现，关于它的性质和特点，是近年来复杂性科学研究中的一个热点。这里要强调的是，一个复杂系统的各个层次通常会表现出不同的特点，一般需要采用不同的方法来进行研究。

#### 4. 相关性

相关性是指系统内部各要素之间的某种相互作用、相互依赖的特定关系。各子系统之间通过特定的关系结合在一起，形成一个具有特定性能的系统。各要素相互影响、相互制约、相互作用，牵一发而动全身。故要求系统内各要素应根据整体目标，尽量避免“内耗”，设法提高系统整体运行效果。

#### 5. 目的性

通常系统都具有某种目的。要达到既定的目的要具有一定的功能，而这正是区别这一系统和另一系统的标志。系统内部各要素就是为实现系统的目的而协调于一个系统之中，并为此进行活动。系统的目的一般用更具体的目标来体现，这些目标可分为若干层次，从而形成一个指标体系。在指标体系中，各个指标之间有时是相互矛盾的，有时是互为消长的。因此，要从整体出发力求获得全局最优的经营效果，要求在矛盾的目标之间做好协调工作，寻求平衡或折中方案。

#### 6. 环境适应性

一个系统之外的一切与它相关联的事物所构成的集合，可称为系统的环境。从环境对系统的作用来看，人们往往认为环境的状态是已知的，只关心环境对系统的作用，而并不关心环境本身的组成、性质和变化。从相互关系上来讲，人们也只讨论环境对系统的作用，而不考虑系统对于环境的影响。在处理具体问题时，为了使问题简单可解，人们往往把不易讨论的部分划归为环境。任何系统都产生于一定的环境之中，又在环境中发展和演化。研究系统必须研究它与环境的相互作用，尤其是环境对系统发展及演化所产生的影响。

系统与环境的划分是相对的，根据实际需要和处理问题的便利，针对同一问题可以选择不同的系统和环境。但应该注意的是，在研究同一个问题的过程中，系统与环境的划分不能任意改变。

任何一个系统都存在于一定的环境中，都与外界环境进行着物质、能量和信息的交换。相互作用的结果有可能使系统的性质和功能发生变化。一些系统具有能适应环境变化、保持或恢复其原有状态的性质和功能，这就是系统的环境适应性。不适应环境变化的系统没有生命力；只有能经常与环境保持最优适应的系统，才是具有不断发展势头的理想系统。

## 1.2 系统的分类

面对世界上千差万别的具体系统，有必要对系统进行分类，以便采用相应的理论进行研究。按照不同的标准，系统有不同的分类。

### 1.2.1 按照系统的属性进行分类

按照属性可以分为自然系统和社会系统，也可以分为实体系统和概念系统等。太阳系、地质构造、森林都属于自然系统。自然系统不属于系统工程直接研究的对象。工厂、学校、农业系统、工业系统属于社会系统。矿物、生物、工厂、学校等物质实体属于实体系统。学科体系、规章制度、指挥系统等属于概念系统，是实体系统在人脑的反映。

### 1.2.2 按照系统与环境的关系进行分类

#### 1. 孤立系统

孤立系统是指与外界没有任何物质、能量、信息的交流，即与周围环境没有任何相互作用的系统。严格来说，自然界并不存在这样的系统，它是因研究需要而提出来的一种理想模型。当系统与外界的相互作用小到可以忽略时，可以被近似看成是孤立系统。

#### 2. 开放系统

开放系统是指与外界既有物质交换，又有能量交换的系统。现实的事物之间总会存在千丝万缕的联系，所以客观世界中的系统大多是这类系统。系统与环境进行物质、能量交换的最简单的情况是，外界环境不因与系统的作用而发生改变，经过一段时间，系统与环境具有相同的浓度（通过交换物质）和相同的温度（通过交换能量），从而达到平衡态，这种情况将其归为孤立系统。这里所研究的开放系统是，起码与两个源（两个热源或两个物质源）相接触，通过交换而形成的一种活的系统。

#### 3. 封闭系统

封闭系统是指与外界没有物质交换但有能量交换的系统。封闭系统是统计物理学与热力学中的概念，本书不讨论封闭系统。

如上所述，如果系统只与一个热源接触，最终必定实现平衡态，我们仍将其归入孤立系统；如果系统与外界多个热源交换热量，则将其划归为开放系统。

### 1.2.3 按照组成系统的实际内容进行分类

#### 1. 物质系统

组成物质系统的基本元素是原子、分子等无机物质。物理学、化学等自然科学的研究对象都属于此类系统，如地质系统。

#### 2. 生物系统

组成系统的基本元素是“活”的生物组织。系统对环境有能动的适应性，使自身在自然界中得以生存和发展，如蛋白质系统。

#### 3. 人类系统

组成系统的基本元素是人。人对于环境不仅有适应性，而且能够主动控制和改造环境，

使系统更适应人类的需要，如社会经济系统。

## 1.2.4 按照系统内各子系统之间的相互关系进行分类

### 1. 线性系统

系统中某部分的变化引起其余部分的变化是线性的，或者说系统的输入线性迭加时，系统的输出也线性迭加，就称该系统是线性系统。对于线性系统，已有比较成熟的理论来分析，它的演化可用线性微分方程进行描述，如经典的控制系统。

### 2. 非线性系统

与线性系统相对，系统内部各组元之间的影响不是线性的，或者说系统的输入、输出不满足迭加原理。对于非线性系统，由于非线性微分方程至今仍没有规范的解法，处理起来要困难得多。所以，对大部分非线性系统模型，当它的变量保持在一定范围之内时，往往被近似表达为线性系统。

## 1.2.5 按照系统状态与时间的关系进行分类

### 1. 静态系统

静态系统是指其状态不随时间改变的系統。这类系统没有记忆，即某时刻的输出仅与系统当前输入有关，而与其他时刻的输入无关。研究静态系统相当于分析系统某一定态的性质。

### 2. 动态系统

动态系统是指系统状态随时间变化的系统。动态系统在某时刻的输出与其他时刻的输入有关。研究动态系统，就要研究系统的时间行为，找出系统状态随时间变化的表达式或运行轨迹。

## 1.2.6 按照系统的演化特点进行分类

### 1. 确定性系统

确定性系统是指外界影响确定、系统的演化规律及子系统之间的相互关系也确定不变的系统。此类系统用确定性方程即可描述。

### 2. 随机系统

系统内部存在某种不确定因素，或者外界对系统施加了随机扰动，这样的系统称为随机系统。此类系统的状态变量是随机变量，常采用概率的方法来描述它的演化行为。

## 1.2.7 按照系统结构的复杂程度进行分类

### 1. 简单系统

简单系统是指包含的子系统数目少，且子系统之间相互作用简单的系统。按规模，简单系统又可分为小系统和大系统，它们的演化通常可采用已有的规范理论（如经典力学理论）来处理。

### 2. 巨系统

巨系统是指包含的子系统数目多，不能用简单系统方法进行处理。按其复杂程

度, 又可将巨系统分为简单巨系统和复杂巨系统。其中, 后者还可细分为一般的复杂巨系统 (亦称复杂适应系统, 如人体系统、生物系统等) 和特殊的复杂巨系统 (亦称开放的复杂巨系统, 如教育系统、经济系统等)。根据综合复杂程度, 系统可以分为如图 1-1 所示的九类系统。

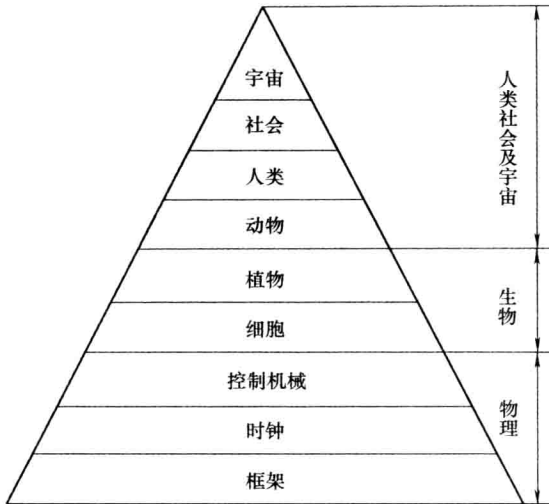


图 1-1 按照综合复杂程度的系统分类

可以看出, 从不同的角度出发, 一个实际系统可以有多种划分, 某一系统同时可以属于不同的系统类型。

## 1.3 系统的结构与功能

### 1.3.1 系统的结构

系统的组成部分可以是单一的、不能再细分的元素, 它们是系统的最小单元, 被称为系统的基本元素, 简称为基元。系统的组成部分也可以是一个系统, 被称作系统的子系统。子系统和基元都是系统的组成部分, 简称组分。

组分与组分之间存在相互作用, 继而形成系统的统一整体, 组分之间的关联方式被称为系统的结构。通常以组分在时间上和空间上的不同关联, 把结构分成时间结构和空间结构。时间结构是指组分在时间过程中的关联方式, 空间结构是指组分在空间中的排列方式。有些系统的结构与时间、空间均有关联, 则称它为时空结构。

从一般的意义上说, 系统的结构可以表示为:

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

式中  $S$ ——系统 (System);

$E$ ——要素 (Elements) 的集合;

$R$ ——建立在集合  $E$  上的各种关系 (Relations) 的集合。

由式 (1-1) 可知, 作为一个系统, 必须包括其要素的集合与关系的集合, 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。

要素集合  $E$  可以分为若干子集  $E_i$ 。例如一个企业, 其要素集合  $E$  可以分为人员子集  $E_1$ 、设备子集  $E_2$ 、原材料子集  $E_3$ 、产品子集  $E_4$  等; 而人员子集  $E_1$  又可以分为工人子集  $E_{11}$ 、技术人员子集  $E_{12}$ 、管理人员子集  $E_{13}$  等。即

$$E = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup \dots \quad (1-2)$$

$$E_1 = E_{11} \cup E_{12} \cup E_{13} \cup \dots \quad (1-3)$$

不同的系统, 其要素  $E$  的组成是不大一样的, 例如学校与企业, 企业与军队, 中国与美国, 其要素集合  $E$  的组成有很大差异。但是在要素集合  $E$  之上建立的关系集合  $R$ , 对系统而言却是大同小异的。在不失一般性的情况下, 它可以表示为

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cup R_4 \quad (1-4)$$

式中  $R_1$ ——要素与要素之间、局部与局部之间的关系 (横向联系);

$R_2$ ——局部与全局 (系统整体) 之间的关系 (纵向联系);

$R_3$ ——系统整体与环境之间的关系;

$R_4$ ——其他各种关系。

当然, 每个  $R_i$  都是可以细分的, 例如  $R_1$ , 不但包含同一层次上不同局部之间、不同要素之间的关系, 还包含系统内部不同层次之间的关系。但是无论对于学校、企业、军队或者国家, 式 (1-4) 都是成立的。

### 1.3.2 系统的功能

系统相对于它所处的环境表现出来的变化称作系统的行为, 它一方面反映了系统自身的变化特性, 另一方面也体现了环境对系统施加的作用或影响。

系统的功能是指由系统行为引起的、有利于环境中某些事物发展乃至整个环境存续的作用。功能是刻画系统行为的, 它是系统与环境关系的重要概念。功能是客观事物的一种整体特性, 一般来说, 整体应具有个体所没有的新功能, 这便是整体涌现性 (Whole Emergence)。整体的功能不等于部分之和, 也正是层次之间不能简单叠加汇总的体现。

系统的功能包括输入、处理和转换 (加工、组装)、输出, 如图 1-2 所示。系统可以理解为是一种处理和转换机构, 它把输入转变为人们所需要的输出。

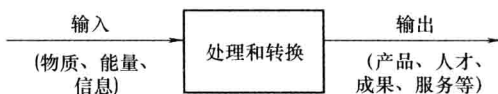


图 1-2 系统功能示意图

系统功能还具有以下特性:

1. 系统功能只有在系统与环境的相互作用过程中才能体现

一个系统, 如果没有内部各要素之间的有机联系, 便不能形成一定的结构, 从而不能称之为系统。同样, 一个系统如果与环境介质之间没有相互作用, 缺乏了系统的动态过程, 也就无所谓功能了。因而功能只能在系统与环境的相互作用过程中体现。就像只有当机器投入了生产, 功能才得以发挥, 潜在的生产力才转化为现实的收益。

2. 系统功能比系统结构具有更大的可变性

系统的功能由结构与环境共同决定。一个系统的基本结构在一定的参数阈值内会保持稳定, 而功能则不然。功能与结构相比具有更大的可变性。系统的外部环境一旦变化, 系统与外部的物质、能量、信息的交换就会随之变动, 系统与环境相互作用的过程和效果受到影响, 从而引起系统功能的变化, 而通常此时系统的结构不会发生改变。



### 3. 系统功能是系统的一种特定的性能

系统的性能是指在系统内部相互作用以及和外部联系的过程中所表现出来的特性和能力。性能一般不是功能，功能却是一种特定的性能。例如，流动是空气的性能，而利用流动进行风力发电则是其功能；可以燃烧是石油的性能，而利用燃烧产生的能量推动机器运转，则是它的功能。可见，性能是功能的基础，功能是性能的表现，功能在特定的环境下将某种性能体现于特定的过程之中。另外，性能是对系统的整体客观描述，而功能仅指其对环境有利的那一部分。

## 1.4 系统思想的发展与系统科学

朴素的系统概念自古有之，源远流长。古中国、古希腊的朴素唯物主义思想家都认为“自然界是一个统一体（系统）”。

系统思想的起源可以追溯到古希腊时期，早在公元前6世纪，西方辩证法的奠基人赫拉克利特（Herakleitos）就提出“世界是包含一切的整体”。公元前5世纪原子论的创始人德莫克里特（Demokritos）写了《宇宙大系统》一书，以系统的角度来研究宇宙。柏拉图的学生亚里士多德后来进一步提出了“整体不同于它各部分的总和”，整体可以不同于其部分的总和成为系统科学历史上的重要问题。

在中国，系统观点十分普遍。例如，《黄帝内经》的《素问·六微旨大论》中讲道：“故器者生化之宇，器散则分之，生化息矣。”《易经》简述了中国古代的系统模式的动态架构，墨家则论及了系统思想的方法论，道家阐述了对于系统生成的看法，老子强调了自然界的统一性。都江堰水利工程是古代朴素系统思想的典型应用，如图1-3所示。战国时期，秦

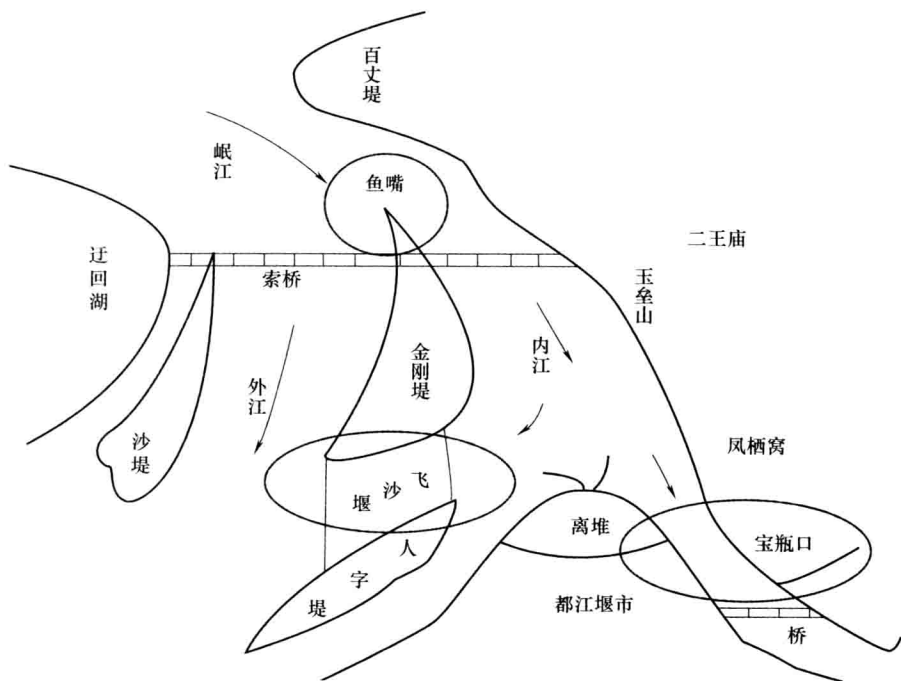


图 1-3 都江堰水利工程示意图



国蜀郡太守李冰及其子主持修建都江堰水利工程，利用岷江水资源灌溉田畴。都江堰水利工程充分利用当地西北高、东南低的地理条件，根据江河出山口处特殊的地形、水脉、水势，因势利导，无坝引水，自流灌溉，使堤防、分水、泄洪、排沙、控流相互依存，共为体系，保证了防洪、灌溉、水运和社会用水综合效益的充分发挥。两千多年来，都江堰一直发挥着巨大效益，是我国最成功的水利工程之一，其总体构思是系统思想的杰出运用。

古代朴素的系统思想虽然强调对自然界整体性与统一性的认识，但是缺乏对其各个部分细节的认识，换句话讲，此阶段的系统思想处于“只见森林不见树木”的阶段。

19世纪上半叶辩证唯物主义诞生，奠定了系统的理论基础。近代研究自然界的独特方法得以发展，包括实验、解剖和观察，把自然界的细节从自然联系中抽出来分别研究。在对自然界分门别类的研究中发展起来的以分析为主的研究方法，虽然对科学发展有过巨大的贡献，久而久之这种方法移植到哲学中，把整体分割成一块块互不联系、孤立、静止的组成部分的观点，即形而上学的思维方式，阻碍了对系统整体的了解。自然科学三大发现（细胞学说、生物进化论、能量守恒与转化定律）促进了人类对自然过程相互联系的认识。

马克思、恩格斯说：“我们以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画”“世界是由无数相互联系、依赖、制约、作用的事物和过程形成的统一整体”。这种普遍联系及其整体性思想就是现代的系统概念，为系统理论的创立奠定了基础。到20世纪40年代贝塔朗菲提出了“一般系统论”（General System Theory）的概念，标志着系统理论的创立。

我国系统科学的发展得益于钱学森院士的贡献。钱学森院士早年在美国从事导弹控制研究的过程中，就认识到自动控制技术的重要性。他在维纳（N. Wiener）《控制论》的基础上，于1954年写出了享誉国际学术界的《工程控制论》，讲的主要就是对系统的调节与控制。这可以说是钱老系统思想的萌芽。1955年回国后，在主导“两弹一星”的成功实践中，钱老运用、发展了这一思想和方法，提出了系统工程的管理理论，继而又把它推广到社会、经济等各个管理领域。20世纪80年代，钱老以“系统学讨论班”（综合集成研讨厅）的方式开始了创建系统学的工作。从1986年到1992年的7年时间里，钱老参加了讨论班的全部学术活动，开创了系统科学这一大的学科门类，产生了深远的影响。在讨论班上，钱老首先提出了系统新的分类，明确界定系统学是研究系统结构与功能（系统演化、协同与控制）一般规律的科学，形成了以简单系统、简单巨系统、一般的复杂巨系统和特殊的复杂巨系统（社会系统）为主线的系统学基本框架，构成了系统学的主要内容，奠定了系统学的科学基础，指明了系统学的研究方向。钱老不仅提出了复杂巨系统的概念，同时还提出了处理这类系统的方法论和方法，即不仅提出了系统论方法，同时还提出了实现系统论方法的方法体系和实践方式。关于钱老的系统科学体系及其内容，将在第3章系统工程方法论中详细论述。

2008年1月19日，胡锦涛总书记在看望钱学森院士时，对他的系统工程和系统科学理论作了高度评价。胡总书记说：“您这个理论强调，在处理复杂问题时一定要注意从整体上加以把握，统筹考虑各方面的因素，理顺它们之间的关系。现在我们强调科学发展，就是要注重统筹兼顾，注重全面协调可持续发展。”钱老听后十分感谢。按照他从系统科学角度的理解，胡锦涛总书记说的“从整体上加以把握”就是系统科学最基本的原理；“统筹考虑各方面的因素”既含有“综合”，也含有“集成”的意思；“理顺它们之间的关系”则主要是指“集成”。而“现在我们强调科学发展，就是要注重统筹兼顾，注重全面协调可持续发展”一句，则是最后归纳总结了科学发展观所蕴含的系统工程、系统科学原理及其方法论。