



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
管理科学名家精品系列教材

系统工程原理

(第二版)

谭跃进 陈英武 罗鹏程 程志君 编著

0001100010100011000100010
00010001000101011



科学出版社



育本科国家级规划教材
管理科学名家精品系列教材

系统工程原理

(第二版)

谭跃进 陈英武 罗鹏程 程志君 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

系统工程是 20 世纪 40 年代发展起来的一门新兴交叉学科,其应用领域十分广阔。本书系统地介绍系统工程的基本概念、理论与方法,特别是系统工程方法论、系统模型与建模方法、系统分析、系统预测、系统评价、系统优化、系统决策、网络计划技术的基本理论和方法等,既较好地解决与运筹学课程部分内容重复的问题,又较好地构建自己的知识体系,尽可能地反映近年来系统工程理论方法的新成果。

本书既可作为高等院校系统工程、管理科学与工程、工商管理、财经类专业以及有关工程技术专业的教材,也可作为管理人员、工程技术人员的培训教材和自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

系统工程原理 / 谭跃进等编著. —2 版, —北京: 科学出版社, 2017

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 管理科学名家精品系列教材

ISBN 978-7-03-051805-7

I. ①系… II. ①谭… III. ①系统工程—高等学校—教材 IV. ①

N945

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 030979 号

责任编辑: 兰 鹏 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

大厂书文印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 2 月第 二 版 印张: 22 1/2

2017 年 2 月第十一次印刷 字数: 534 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

20 世纪 40 年代以来,科学技术取得了巨大进步,出现了研制计算机、导弹和宇宙飞船等大学科、大工程。这些大学科、大工程,运用系统工程方法取得了显著成效,对系统工程的发展起到了推动作用,同时也标志着人类在组织管理技术上迎来了一个新时代。

现代系统科学与系统工程的发展,体现在系统哲学、系统方法、系统技术和系统实践各个层面上,系统工程思想已广泛应用于传统科学及人们日常生活管理的许多领域,它改变了人们观察世界的方法和角度,并丰富了人类对自然和社会的认识。

我国的系统科学与系统工程是在著名科学家钱学森教授的直接倡导下建立和发展起来的。20 世纪 60 年代初期,在国防尖端技术方面应用系统工程方法取得了显著成效。60~70 年代着重于传播系统工程理论、方法。80~90 年代独立地开展系统工程理论、方法 and 应用研究,取得了创新性进展。

1979 年,国防科学技术大学系统工程与数学系由钱学森教授亲自组建,招收了系统工程专业本科生和研究生,继而又获得了系统工程硕士、博士学位授予权。30 多年来,“系统工程原理”课程一直是该专业的主干课程,《系统工程方法论》《系统工程原理》等教材先后出版。这次重新出版的《系统工程原理》,是作者在上述基础上,根据多年从事系统工程教学和科研的实践经验编写而成的。本书面向 21 世纪人才培养的高要求,较系统地介绍了系统工程的基本概念、理论和方法,避免了与运筹学课程内容的重复,加强了对相关计算实践及软件应用的指导,较好地反映了近年来系统工程理论方法的新成果。因此,本书的正式出版是一件值得庆贺的事。

系统工程作为一门新兴的综合性的边缘学科,在理论上、方法上和体系上都处在发展之中,它必将随着生产技术、基础理论、计算工具的发展而不断发展。因此,可以预料,在此过程中该书亦将不断更新、丰富和完善。

汪浩

2010 年 9 月于长沙

第二版前言

1978年9月,钱学森、许国志、王寿云共同发表了《组织管理的技术——系统工程》一文,这是我国开创系统科学与系统工程事业的标志。系统科学是一门从总体上研究复杂系统共同运动规律的科学,而系统工程则是一门系统科学、工程技术学、经济学、管理学等相结合的组织管理技术,是一种改造客观世界的工程技术,也是一种运筹与决策的艺术。

随着科学技术的进步、社会经济的发展,构成客观世界的三个基本要素——物质、能量和信息不断丰富,使事物之间的相互联系日益加强,整个世界朝着复杂性不断增加的方向发展。这是不以人的主观意志为转移的客观规律。正如一般系统创始人冯·贝塔朗非所指出的,“无论如何,我们被迫在知识的一切领域中运用‘整体’或者‘系统’来处理复杂性问题,这将对科学思维的一个根本改造”。因此,面对复杂系统,系统科学与系统工程将会受到越来越广泛的重视。

2010年,我们编写并出版了《系统工程原理》一书。这部书较好地解决了与运筹学课程内容重复的问题,几年来,在国防科学技术大学相关专业本科课程和继续教育课程中作为教材使用,并取得了很好的效果。国内数十所兄弟院校也将本书作为本科课程教材或参考书,并给出了较好的评价。通过多年的教学实践,我们结合新时期人才培养的目标和要求,编写了《系统工程原理》(第二版)。新编的第二版教材进一步优化了教学选材,精炼了教学内容,剔除了原书中部分比较陈旧的内容,将一些近年来系统工程理论方法的新成果编入其中。全书由原来的七章扩充为现在的九章,主要内容如下。

第1章 绪论,介绍系统、系统工程和系统科学体系的基本概念。

第2章 系统工程方法论,介绍霍尔和切克兰德的方法论、物理-事理-人理(WSR)方法论、并行工程方法学、钱学森等提出的综合集成工程方法学、“5W1H”方法及系统工程“V”模型等。

第3章 系统模型与建模方法,介绍系统模型的定义、特征和分类,重点是系统工程的建模方法和解析结构模型。

第4章 系统分析,介绍系统分析的概念,以及系统目标、环境、功能、结构分析等系统分析的内容,介绍系统分析的方法和案例。

第5章 系统预测,介绍定性预测、时间序列分析预测、回归分析预测、状态空间分析预测和马尔可夫预测等方法。

第6章 系统评价,介绍系统评价指标数量化方法、评价指标综合方法、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、网络分析法(analytic network process, ANP)、模

糊综合评价方法及数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 法。

第7章 系统优化, 介绍系统优化的概念、线性规划方法, 以及运输问题、动态规划问题、资源分配问题模型。

第8章 系统决策, 介绍风险型决策方法、完全不确定型决策、贝叶斯决策、多目标决策及系统决策中的几个问题。

第9章 网络计划技术, 介绍网络图的绘制、参数计算、调整与优化、网络的时间-费用分析和系统网络技术的应用。

每章后配有适量的习题和思考题, 让学生既掌握方法的原理, 又能通过各种计算软件的自学习, 加强方法应用, 提高分析问题和解决问题的能力。

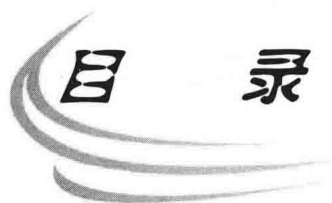
本书第1、2、3、7、9章由谭跃进编写, 第6、8章由罗鹏程编写, 第4、5章由程志君编写, 全书由谭跃进和陈英武修改统稿。

本书在编写出版过程中, 得到了国防科学技术大学信息系统与管理学院, 以及该院管理系有关领导和同志们的大力支持与大力帮助, 汪浩、郭波、朱一凡、周经伦、龚时雨、王晖等几位教授热情关怀并对本书提出了宝贵的意见和建议, 汪浩教授还为本书做了序, 在此表示衷心感谢! 此外, 本书编写过程中参考了一些作者的教材和专著, 如总装备部工程兵科研二所编写的《武器装备发展系统论证方法与应用》、孙东川教授主编的《系统工程引论》、吴祈宗教授主编的《系统工程》、陈宏民教授主编的《系统工程导论》, 以及杜栋教授主编的《现代综合评价方法与案例精选》等, 在此一并感谢, 不再一一列举。

由于系统工程是一门正在发展且还未成熟的新兴学科, 同时由于笔者的水平有限, 书中疏漏之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

谭跃进

2017年1月于长沙



第1章	
	绪论..... 1
1.1	系统的概念..... 1
1.2	系统工程的概念..... 7
1.3	系统科学体系..... 14
	本章小结..... 23
	思考题·习题..... 24
第2章	
	系统工程方法论..... 25
2.1	霍尔的“三维结构”模型..... 25
2.2	切克兰德的“调查学习”方法..... 32
2.3	并行工程方法学..... 33
2.4	综合集成工程方法学..... 36
2.5	物理-事理-人理 (WSR) 系统方法论..... 37
2.6	“5W1H”方法..... 41
2.7	系统工程“V”模型..... 42
	本章小结..... 45
	思考题·习题..... 46
第3章	
	系统模型与建模方法..... 47
3.1	系统模型概述..... 47
3.2	系统工程的模型方法..... 55
3.3	系统建模方法..... 62
3.4	解析结构模型..... 69
	本章小结..... 85
	思考题·习题..... 85

第4章

系统分析	87
4.1 系统分析概述	87
4.2 系统分析的内容	93
4.3 系统分析方法	114
4.4 系统分析案例	123
本章小结	134
思考题·习题	135

第5章

系统预测	136
5.1 系统预测概述	136
5.2 定性预测方法	141
5.3 时间序列分析预测	146
5.4 回归分析预测	160
5.5 状态空间分析预测	172
5.6 马尔可夫预测	178
本章小结	184
思考题·习题	184

第6章

系统评价	187
6.1 系统评价概述	187
6.2 模糊综合评价法	202
6.3 层次分析法	208
6.4 网络分析法	215
6.5 数据包络分析法	223
本章小结	228
思考题·习题	229

第7章

系统优化	232
7.1 系统优化概述	232
7.2 线性规划问题及其数学模型	234
7.3 线性规划问题的单纯形法	238
7.4 运输问题	241
7.5 动态规划	244
7.6 资源分配问题	250

本章小结	254
思考题·习题	254

第 8 章

系统决策	256
8.1 系统决策概述	256
8.2 风险型决策	260
8.3 完全不确定型决策	267
8.4 贝叶斯决策	270
8.5 系统决策中的几个问题	273
8.6 多目标决策	278
本章小结	291
思考题·习题	292

第 9 章

网络计划技术	294
9.1 网络计划技术概述	294
9.2 网络图的组成及绘制	295
9.3 网络图的参数及其计算	301
9.4 任务按期完成的概率分析与计算	309
9.5 网络图的调整与优化	313
9.6 网络的时间-费用分析与优化	322
9.7 网络计划技术的应用	326
本章小结	332
思考题·习题	333

参考文献	334
------------	-----

附录	336
----------	-----

附录一 标准正态分布	336
附录二 $k=1$ 时的相关系数检验表	337
附录三 t 分布检验临界值表	338
附录四 F 分布表	340
附录五 DW 检验表	343
附录六 χ^2 分布的临界值	349

1.1 系统的概念

1.1.1 系统的定义

系统一词来源于人类长期的社会实践，存在于自然界、人类社会及人类思维描述的各个领域，早已为人们所熟悉。究竟什么是系统呢？往往不同的人或同一个人不同的场合会对它赋予不同的含义。系统一词频繁出现在学术讨论和社会生活中，包罗万象的外延，使其成为逻辑上空无一物的概念。概念上的混淆将给系统研究带来一定的困难。因此，我们从系统基本特征的角度，去寻找一种较为通用的描述方式，对系统下一个较为科学的定义。为此，我们采用钱学森给出的对系统的描述性定义：系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体，记为

$$S = \langle E, R \rangle$$

式中， E (elements) 为系统 S (system) 中所有元素构成的集合； R (relationship) 为系统中所有关系的集合。

这个定义，与类似的许多定义一样，指出了系统的三个基本特征。第一，系统是由若干元素组成的；第二，这些元素相互作用、相互依赖；第三，元素间的相互作用，使系统作为一个整体具有特定的功能。虽然系统的定义有各种表述，但都包含了这三个方面，即这三点是定义系统的基本出发点。

在美国的《韦氏大辞典》中，系统一词被解释为“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综合；由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合等”。在日本工业标准 (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标行动的集合体”。苏联大百科全书 (1976 年版) 将系统定义为“一些相互关联与联系的要素组成的集合，形成了一定的整体性、统一性”。

1.1.2 系统的特性

由系统的定义, 不难总结出系统一般应具有下述特性。

1) 整体性

系统整体性说明, 具有独立功能的系统要素及要素间的相互关系是根据逻辑统一性的要求, 协调存在于系统整体之中的。也就是说, 对任何一个要素不能离开整体去研究, 对要素之间的联系和作用也不能脱离整体去考虑。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, 要素的机能和要素之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、要素间的相互联系要服从系统整体的功能与目的, 在整体功能的基础上展开各要素及其相互之间的活动, 这种活动的总和形成了系统整体的有机行为。系统的整体性就是强调“整体功能大于各部分功能之和”, 即“ $1+1>2$ ”。整体性具体体现在系统具有整体的结构、整体的特性、整体的状态、整体的行为和整体的功能上。

2) 层次性

从系统作为一个相互作用的诸要素的总体来看, 它可以分解为一系列不同层次的子系统, 并存在一定的层次结构。而它本身又是它所从属的一个更大系统的子系统。例如, 在生命系统中, 细胞 $\subset$ 器官 $\subset$ 生物体 $\subset$ 群体 $\subset$ 组织 $\subset$ 社会。这是系统结构的一种形式, 其在系统层次结构中表述了不同层次子系统之间的从属关系或相互作用关系。在不同的层次结构中存在不同的运动形式, 它们构成了系统的整体运动特性, 为深入研究复杂系统的结构、功能和有效地进行控制与调节提供了条件。

3) 相关性

组成系统的要素是相互联系、相互作用的, 相关性说明了这些联系之间的特定关系和演变规律。例如, 城市是一个大系统, 它由资源系统、市政系统、文化教育系统、医疗卫生系统、商业系统、工业系统、交通运输系统、邮电通信系统等相互联系的部分组成, 并通过系统内各子系统相互协调的运转去完成城市生活和发展的特定目标。各子系统之间具有密切的关系, 它们相互影响、相互制约、相互作用, 牵一发而动全身。这要求系统内的各个子系统根据整体目标, 尽量避免系统的“内耗”, 改善系统整体运行的效果。

4) 目的性

通常系统都具有某种目的。为达到既定的目的, 系统都具有一定的功能, 而这正是区别这一系统和那一系统的标志。系统的目的一般用更具体的目标来体现, 比较复杂的社会经济系统都具有不止一个目标, 因此需要用一个指标体系来描述系统的目标。例如, 衡量一个工业企业的经营业绩, 不仅要考核它的产量、产值指标, 而且还要考核它的成本、利润和质量指标。在指标体系中各个指标之间有时是相互矛盾的, 为此, 要从整体出发, 力求获得全局最优的经营效果, 这就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。

5) 适应性

任何一个系统都存在于一定的物质环境之中,因此,它必然要与外界产生物质、能量和信息交换,外界环境的变化必然会引起系统内部各要素的变化。不能适应环境变化的系统是没有生命力的,只有能够经常与外界环境保持最优适应状态的系统,才是具有不断发展势头的理想系统。例如,一个企业必须经常了解市场动态、同类企业的经营动向、有关行业的发展动态和国内外市场的需求等环境的变化,在此基础上研究企业的经营策略,调整企业的内部结构,以适应环境的变化。

1.1.3 系统的结构与功能

系统结构就是组分(子系统)及组分(子系统)之间关联方式的总和。关联方式主要是因果关系(数学和逻辑关系),其表现形式有树状结构和网状(网络)结构两种。系统的结构从动态性上可划分为系统框架结构与运行结构,即静态结构与动态结构;从时空性上可划分为系统时间结构、空间结构和时-空关联结构。

系统功能就是系统所产生的、有利于系统和环境中某些事物,乃至整个系统和环境续存与发展的作用。凡系统必有结构,结构与功能的关系密切,系统结构和运行环境共同决定系统功能。

系统行为就是系统功能的一种外部表现,是系统相对于它的环境所表现出来的任何变化。行为属于系统自身的变化,是系统自身特性的表现,但又同环境有关,反映环境对系统的作用或影响。

在系统结构研究中,复杂网络的研究已成为关注的热点。绝大部分事物都可以看做网络,而且许多网络非常复杂。不同的复杂网络可以具有相似的结构性质与共性的问题,而且网络结构与功能密切相关。

1.1.4 系统的分类

在自然界和人类社会中普遍存在着各种不同性质的系统。为了对系统的性质加以研究,需要对系统存在的各种形态加以探讨。

1. 自然系统与人造系统

按照系统的起源,自然系统是由自然过程产生的系统。这类系统是自然物(矿物、植物、动物等)所自然形成的系统,如海洋系统、生态系统等。人造系统则是人们将有关元素按其属性和相互关系组合而成的系统,如人类对自然物质进行加工并制造出各种机器所构成的各种工程系统。

实际上,大多数系统是自然系统与人造系统的复合系统。例如,在人造系统中,有许多是人们运用科学技术改造了的自然系统。随着科学技术的发展,出现了越来越多的

人造系统。但是，值得注意的是，许多人造系统的出现，破坏了自然生态系统的平衡，造成了严重的环境污染，并破坏了生态系统的良性循环。近年来，系统工程（systems engineering, SE）越来越注重从自然系统的属性和关系中探讨研究人造系统。

2. 实体系统与概念系统

凡是以矿物、生物、机械和人群等实体为构成要素的系统都称为实体系统。凡是由概念、原理、原则、方法、制度、程序等概念性的非物质实体所构成的系统都称为概念系统，如管理系统、军事指挥系统、社会系统等。在实际生活中，实体系统和概念系统在多数情况下是结合的，实体系统是概念系统的物质基础，而概念系统往往是实体系统的中枢神经，指导实体系统的行为。例如，军事指挥系统中既包括军事指挥员的思想、信息、原则、命令等概念系统，也包括计算机系统、通信设备系统等实体系统。

3. 动态系统与静态系统

动态系统就是系统的状态变量随时间变化的系统，即系统的状态变量是时间的函数。而静态系统则是表征系统运行规律的数学模型中不含有时间因素，即模型中的变量不随时间变化，它是动态系统的一种极限状态，即处于稳定的系统。例如，一个化工生产系统是一种连续生产过程且系统中的参数随着时间变化而变化的动态系统。大多数系统都是动态系统，但是，由于动态系统中各种参数之间的相互关系是非常复杂的，要找出其中的规律性非常困难。有时为了简化而假设系统是静态的，或是假设系统中的参数随时间变化的幅度很小而将其视为静态的。

4. 控制系统与行为系统

控制就是为了达到某个目的给对象系统所加的必要动作，因此，为了实行控制而构成的系统叫做控制系统。控制系统由控制装置自动进行时，称为自动控制系统，如计算机控制的机械加工生产过程就是自动控制系统。行为系统是以行为为构成要素而形成的系统。所谓行为就是为了达到某一确定的目的而执行某种特定功能的一种作用，这种作用能对外部环境产生某些效用。这种系统一般是根据某种运行机制而实现某种特定行为的系统，而不是受某种控制作用而运行的系统。

5. 开放系统与封闭系统

开放系统是指与其环境之间有物质、能量或信息交换的系统，封闭系统则相反，即系统与环境互相隔绝，它们之间没有任何物质、能量和信息交换。照此定义，可把封闭系统当成与环境完全隔绝的孤立系统。开放系统还可进一步区分为只有能量交换的系统，同时进行物质、能量交换的系统，以及物质、能量、信息开放的系统。最早涉及开放与

封闭系统研究的领域是物理学。但物理学中的概念与本书中的概念不同,它们之间的区别如下:①本书定义的封闭系统,物理学称为孤立系统;②本书定义的只有能量交换的系统,物理学称为封闭系统;③本书定义的同时进行物质、能量交换的系统,物理学称为开放系统;④本书定义的物质、能量和信息开放的系统,物理学尚无专门定义。

本书的上述定义具有普遍性,适用于无生命系统、生命系统和社会系统。无生命系统可能是封闭的,也可能是开放的。如果忽略落下的流星和宇宙尘埃,地球就成为一个与其所处的环境只有能量交换的开放系统。地球接收到太阳和恒星的辐射,而它自己又向星际的辐射冷区进行辐射。通常,生命系统、社会系统都是开放系统。物质、能量和信息的开放,对生命和社会系统具有特别重要的意义。处在不同层次上的生命系统,呈现开放性的机制也不同。例如,在生物个体层次上,物质、能量交换由食物体现,信息由感觉器官摄取;对于社会组织,物质、能量以货币为中介,以商品的形式进行交换,信息是以语言、文字和电磁波为载体进行传播,计算机(当然还有其他传统工具)作为信息处理的辅助工具。

1.1.5 复杂系统及其特点

现代化使构成客观世界的物质、能量和信息不断丰富,其结果是事物之间的相互联系加强,整个世界朝着复杂性不断增加的方向发展,空间越来越拥挤,物质、信息传输速度越来越快,事物之间的普遍联系不断加强,如全球经济一体化进程的加快和二氧化碳排放对全球气候的影响等。因此,我们面临的问题和处理的系统越来越复杂,复杂系统的出现是不以人的主观意志为转移的。

复杂系统的外部特点是规模大且行为复杂,而它的内在特点如下:①开放性,考虑系统与其环境之间的物质、能量或信息交换,更能反映客观世界的真实性;②非线性,具有多解、多稳态,能够描述稳定性交换,更能追踪客观世界的多样性;③随机性,微涨落放大,更能体现系统从无序到有序或从有序到混沌的自发性;④涌现性,局部的关系,导致系统整体的涌现行为,更能体现系统结构与行为演化的目的性。

按照复杂系统的观点,钱学森提出了一个关于系统的分类,即把系统分为简单系统和巨系统;简单系统又分为小系统和大系统;巨系统又分为简单巨系统和复杂巨系统;复杂巨系统又分为一般复杂巨系统和开放的复杂巨系统(open complex giant system)。小系统大体上说是由几个、几十个元素组成的系统;大系统是由几百个、上千个元素组成的系统;巨系统的元素数量巨大,成千上万甚至上亿或万亿。

20世纪60年代末学界提出了大系统概念和大系统理论,随着社会经济、生态环境等系统成为研究对象,人们发现还存在比大系统规模大得多的系统。70年代末,钱学森在论述社会系统工程时第一次提出巨系统概念。巨系统的行为特性不同于小系统和大系统。简单巨系统的元素虽然数量巨大,但单元素之间的关系满足线性叠加原理。在巨系统中,如果不仅系统元素数量巨大,而且组分之间的关联方式复杂(如非线性、不确定性、模糊性、动态性、适应性等),那么系统就是复杂巨系统。例如,人的大脑作为一个

巨系统,所包含的神经元约达到 10^{11} 数量级。从人脑系统行为特性看,人的大脑是一个典型的复杂巨系统。人类社会是一个巨系统(如中国人口数量超过 13 亿,达到 1.3×10^9 数量级),这个系统与环境进行物质、能量、信息的交换,接受环境的输入和干扰,向环境提供输出,而且不断适应和不断进化,是一个典型的开放的复杂巨系统。

从小系统、大系统到巨系统,再到复杂巨系统、开放的复杂巨系统,是事物发展的必然结果,也是系统认识发展的必然结果。因此,关于系统的概念源于系统,并随着系统的发展而发展。有了不断发展的系统概念,才有了不断发展的系统理论、方法和工程实践。不同类型的系统问题要用不同的方法去解决。例如,巨系统问题要求建立巨系统理论和方法,大系统理论不能用来解决巨系统问题,简单巨系统理论不能用来解决复杂巨系统问题。在开放的复杂巨系统理论的形成过程中,“巨”、“复杂”和“开放的”三个限制词是逐步加上去的。从一般的系统概念中区分出巨系统概念,把巨系统区分为简单与复杂两种,再强调系统的开放性,区分出开放的复杂巨系统,是钱学森系统思想的三次飞跃。

1.1.6 体系的概念

进入 21 世纪以来,以信息技术为代表的各项高新技术的广泛应用,使系统之间的联系和交互变得越来越频繁。系统间的联系多以信息为介质,以网络为载体,通过互联、互通或互操作实现系统间的交互和协同,以完成共同的目标和使命。在这一背景下,不论是在交通、能源、环境、信息、军事、航天等领域,还是在国家安全和社会科学领域,体系及体系工程逐渐成为新的研究热点。

关于体系的概念,目前还没有统一的定义,其含义大同小异,最多的提法是,体系是系统的系统(system of systems, SoS)。除 SoS 外,其他相似的提法还有 systems within systems、family of systems、super-systems、meta-systems、complex systems 等。因此,我们把体系定义为:体系是基于统一的标准,一组地理上分布广泛且具有独立功能的系统集成完成的能完成单个系统所无法完成的特定目标的新的更大的系统。

美国国防部把体系定义为:体系是相互关联起来实现指定能力的独立系统集成或阵列,其中任意组成部分的缺失都会使整体能力严重退化。

例如,交通运输有铁路、公路、水上、空中运输等多个相互独立运行的系统,从某种意义上讲,它们之间还存在相互竞争的关系。但是,在国家利益上,它们之间更要相互配合、协调发展,形成一个有机的整体,满足国民经济建设和人民生活不同层次的需要。因此,根据体系的定义,交通运输体系是由铁路、公路、水上、空中等运输系统构成的一个典型的体系。类似的体系还有能源体系(包括核能、火电、水电、太阳能、风能等多种能源系统)、社会保障体系、武器装备体系、综合电子信息系统等。

体系与系统比较,有如下主要特征:①规模大,结构复杂,由组分系统协作集成;②组分系统在地理上分布广泛,可独立运行、独立管理,具有独立的功能;③目的性强,但目标不固定,可动态配置资源以适应不同任务的需要;④组分系统完成共同目标时相

互依赖，可同时执行和互操作；⑤开发过程实行集中管理和规划，不断演化发展，涌现新的行为和功能；⑥重视协调和开发来自不同的组织人员（利益相关者）完成共同目标的能力。

体系与系统的特征比较见表 1.1.1，三种典型的体系结构示意图见图 1.1.1。

表 1.1.1 体系与系统的特征比较

特征	系统	体系
需求	明确	动态变化
管理	单一管理	分散管理、集中控制
规划	固定	动态、高度不确定
组分构成	数量较少的物理部件或子系统	数量较多的独立系统，可根据需要增减组分系统
目标	满足一定的功能	满足某种能力
耦合	紧耦合	松耦合
边界	相对固定	比较模糊
操作	相对单一	组分系统间互操作
结构	相对简单	高度复杂
寿命周期	较短	不断演化、更新
涌现行为	一般没有	常有
地域分布	不广泛	广泛

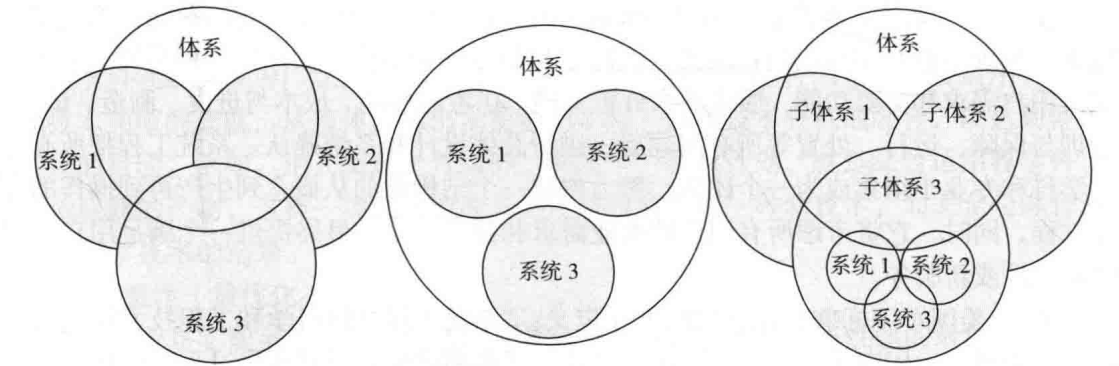


图 1.1.1 三种典型的体系结构示意图

1.2 系统工程的概念

1.2.1 系统工程的定义

系统工程是一门正处于发展阶段的新兴学科，其应用领域十分广阔。由于它与其他学科的相互渗透、相互影响，不同专业领域的人对它的理解不尽相同。因此，要给出一

个统一的定义比较困难。下面列举国内外学术和工程界对系统工程的一些定义，它们可为我们认识系统工程这门学科的性质提供参考。

(1) 中国著名科学家钱学森教授指出，“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”，“系统工程是一门组织管理的技术”。

(2) 美国著名学者切斯纳 (Chestnut) 指出：“系统工程认为虽然每个系统都由许多不同的特殊功能部分组成，而这些功能部分之间又存在着相互关系，但是每一个系统都是完整的整体，每一个系统都要求有一个或若干个目标。系统工程则是按照各个目标进行权衡，全面求得最优解（或满意解）的方法，并使各组成部分能够最大限度地互相适应。”

(3) 日本学者三浦武雄指出：“系统工程与其他工程学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边缘科学。因为系统工程的目的是研究系统，而系统不仅涉及工程学的领域，还涉及社会、经济和政治等领域，为了圆满解决这些交叉领域的问题，除了需要某些纵向的专门技术以外，还要有一种技术从横向把它们组织起来，这种横向技术就是系统工程，也就是研究系统所需的思想、技术和理论等体系化的总称。”

(4) 《中国大百科全书·自动控制与系统工程卷》指出：“系统工程是从整体出发合理开发、设计、实施和运用系统的工程技术。它是系统科学中直接改造世界的工程技术。”

(5) 日本工业标准规定：“系统工程是为了更好地实现系统目标，而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机构等进行分析与设计的技术。”

(6) 国际系统工程协会 (The International Council on Systems Engineering, INCOSE) 定义：系统工程是实现成功系统的一种跨学科的方法和手段。在开发过程早期，它关注定义用户需求和必要功能，形成需求分析文档，在考虑性能、成本与进度、制造、试验、培训与保障、运行、处置等所有问题后，进行总体设计和系统确认。系统工程把所有相关学科和专业小组集成为一个团队，努力构建一个结构化的从概念到生产再到操作的开发过程，同时，它将考虑所有用户的商业需求和技术要求，最终提供一个满足用户需求的新产品或新服务。

(7) 美国军用标准 MIL-STD-499A 定义：“系统工程是将科学和工程技术的成就应用于：①通过运用定义、综合、分析、设计、试验和评价的反复迭代过程，将作战需求转变为一组系统性能参数和系统技术状态的描述；②综合有关的技术参数，确保所有物理、功能和程序接口的兼容性，以便优化整个系统的定义和设计；③将可靠性、维修性、安全性、生存性、人素工程和其他有关因素综合到整个工程工作之中，以满足费用、进度、保障性和技术性能指标。”这实际上是一个军事装备系统工程的定义。

系统工程既是一个技术过程，又是一个管理过程。为了成功地完成系统的研制，在整个系统寿命周期内，技术和管理两方面都很重要。定义 (7) 主要关注技术过程。从政府对工程项目进行管理出发，更赞成从管理角度来定义系统工程。因此，美国防务系统管理学院把系统工程定义为“是为了达到所有系统要素的优化平衡，控制整个系统研制工作的管理功能，把作战需求转变为一组系统参数的描述，并综合这些参数以优化整个