

全国高等学校管理科学与工程类专业规划教材

系统工程


周华任 姚泽清 杨满喜 等编著

Systems
**Systems
Engineering**



清华大学出版社

全国高等学校管理科学与工程类专业规划教材



系统工程

周华任 姚泽清 杨满喜 等编著

Systems
**Systems
Engineering**

清华大学出版社
北京

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

系统工程/周华任等编著. —北京：清华大学出版社，2011.9
(全国高等学校管理科学与工程类专业规划教材)

ISBN 978-7-302-26367-8

I. ①系… II. ①周… 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(2011)第157320号

责任编辑：贺岩

责任校对：王荣静

责任印制：杨艳

出版发行：清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机：010-62770175

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地址：北京清华大学学研大厦A座

邮编：100084

邮购：010-62786544

印装者：北京国马印刷厂

经销：全国新华书店

开本：185×230

印张：12

字数：253千字

版次：2011年9月第1版

印次：2011年9月第1次印刷

印数：1~4000

定价：22.00元

产品编号：037200-01

作者简介

周华任 湖南衡南人，副教授，博士。从事高等数学教学工作以及运筹学和随机过程方面的研究工作。出版专著《路线图：一种新型战略管理工具》、《军事需求论》和《集值随机分析》，出版《运筹学解题指导》、《C语言解题指导》、《线性代数解题指导》、《运筹学学考指要》和《随机运筹学》等十多本教材，发表学术论文60余篇。曾获国防大学优秀科研成果奖和军队科学技术进步奖三等奖。

姚泽清 浙江湖州人，北京大学概率统计系理学硕士。现为中国人民解放军理工大学理学院应用数学与物理系主任，教授，江苏省数学学会常务理事，军队院校数学教学协作联席会秘书长。主要研究方向为数据挖掘与统计决策。出版《应用泛函分析》、《概率统计导学》、《线性代数导学》、《奇妙的概率世界》等书籍，发表学术论文40余篇。曾获国家教委科技进步二等奖、军队级教学成果二等奖和军队科学技术进步三等奖，为军队优秀专业技术干部一类岗位津贴获得者。

杨满喜 安徽东至人，国防大学军事运筹学硕士，讲师。主要从事军事运筹、系统工程和模拟系统的研究工作。发表学术论文20余篇。参加过多项重大课题的研发工作，科研成果先后获军队科学技术进步三等奖和优秀科研成果奖。

内容简介

系统工程是20世纪中期发展起来的一门新兴交叉学科，其应用领域十分广阔。本书介绍了系统工程的基本概念、理论和方法，特别是系统分析、系统模拟、系统评价、系统预测、系统决策、系统管理、层次分析法和网络层次分析法，以及统筹法的基本理论及其应用，尽可能地反映近年来系统工程理论方法的新成果。

本书可作为高等院校系统工程、管理工程、工商管理、财经类专业以及有关工程技术专业的教材，也可供其他相关学科、专业教学使用，或可作为管理人员、工程技术人员、领导干部的培训教材和自学参考书。

前言

PREFACE

系统工程是 20 世纪中期开始兴起的一门交叉学科,是从总体出发,合理开发、运行和革新一个大规模复杂系统所需思想、理论、方法与技术的总称,属于一门综合性的工程技术。系统工程同时也是一门系统科学、工程技术学、经济学和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。

由于科学技术的飞速发展,尤其是信息技术的发展,使经济及管理环境发生了革命性变化,系统性问题及系统化管理的要求日益突出和紧迫,需要按照系统的观点和采用系统分析的方法来认识、研究和解决问题。

本书是根据作者多年从事系统工程实践、总结系统开发和授课经验编写而成的。本书面向 21 世纪人才培养的更高要求,尽可能反映近年来系统工程理论方法的新成果。全书共分为 10 章。

第 1 章 系统工程概述,概述系统工程的产生、发展及应用,系统工程的研究对象、概念与特点等,重点介绍最新的研究动态体系以及体系工程的概念。

第 2 章 系统工程方法论,介绍霍尔和切克兰德的方法论,以兰德公司为代表的系统分析方法,以钱学森为代表的系统集成工程方法学,物理—事理—人理系统方法论,从而建立起系统工程的理论基础。

第 3 章 系统分析,介绍系统的环境分析、目标分析、结构分析及结构模型。

第 4 章 系统模拟,介绍系统模型定义、特征和分类,以及系统模拟的理论与方法。

第 5 章 系统评价,介绍系统评价原理的常用方法。

第 6 章 系统预测,介绍系统预测的定性预测方法、定量预测方法和马尔可夫预测方法等常用方法。

第 7 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、决策树方法、效用决策以及模糊型决策等。

第 8 章 系统管理,介绍系统管理的方法,通过矩阵式管理、柔性战略以及路线图,探讨系统工程思想、方法的应用。

第 9 章 层次分析法和网络层次分析法的基本原理与应用。

第 10 章 统筹法,介绍系统管理中的关键节点的管理方法以及排序理论。

本书适用于管理类各专业的本科生、研究生教学,也可供其他相关学科、专业教学使用,或作为有关人员的培训教材和自学参考书。

本书由周华任、姚泽清、杨满喜、马元正、李喜波和陈玉金编写。

系统工程涉及的知识面非常广泛,又是一门尚在发展中的交叉学科。限于我们的水平,书中不妥和错漏之处在所难免,恳请专家和广大读者批评指正。

编 者

2011年5月

目 录 CONTENTS

第 1 章 系统工程概述	1
1.1 系统工程的产生、发展及应用	1
1.2 系统工程的研究对象	3
1.3 系统的概念与特点	6
1.4 体系与体系工程	9
习题	12
第 2 章 系统工程方法论	14
2.1 以霍尔为代表的硬系统工程方法论	14
2.2 以切克兰德为代表的软系统工程方法论	17
2.3 以兰德公司为代表的系统分析方法论	19
2.4 以钱学森为代表的从定性到定量的综合集成方法论	22
2.5 物理—事理—人理系统方法论	24
习题	25
第 3 章 系统分析	26
3.1 系统分析简介	26
3.2 系统的环境分析	29
3.3 系统的目标分析	30
3.4 系统的结构分析	32
3.5 系统的结构模型	35
习题	38
第 4 章 系统模拟	39
4.1 系统模拟概论	39
4.2 随机模拟方法	45
4.3 产生已知分布规律的随机变量	48
4.4 随机模拟方法的应用	51
习题	57

第 5 章 系统评价	60
5.1 系统评价概述	60
5.2 费用—效益分析	64
5.3 评分法	65
5.4 优序法	67
5.5 关系矩阵法	68
5.6 模糊综合评价	71
习题	75
第 6 章 系统预测	76
6.1 预测概述	76
6.2 定性预测方法	79
6.3 定量预测方法	85
6.4 马尔可夫预测方法	92
习题	99
第 7 章 系统决策	101
7.1 决策问题及其特征	101
7.2 不确定型决策分析方法	104
7.3 先验概率决策分析	110
7.4 后验概率决策分析	114
7.5 决策树	116
7.6 效用决策分析	120
7.7 模糊型决策	124
7.8 多目标决策方法	126
习题	128
第 8 章 系统管理	131
8.1 战略研究与管理	131
8.2 战略管理的发展趋势	133
8.3 路线图	135
8.4 网络化管理	144
8.5 矩阵式管理	146
习题	152

第 9 章 层次分析法和网络层次分析法	153
9.1 层次分析法的基本原理	154
9.2 层次分析法的步骤	155
9.3 层次分析法的计算方法	159
9.4 层次分析法的应用	163
9.5 网络层次分析法	168
习题	171
第 10 章 统筹论	172
10.1 网络计划图	172
10.2 排序理论	178
习题	182
参考文献	183

在当今世界,随着经济和科学技术的迅速发展,生产的规模、社会活动的规模、科学研究以及人类文化活动的规模日益扩大,各部门之间的联系日益密切,逐渐形成了一个有机整体。人类不得不从总体上、从系统上来认识和处理问题,而在人类长期实践中形成的“系统”的概念,便日益引人注目。尤其在现代信息化的时代,人们的活动不知不觉地置身于一个一个的系统中。

1.1 系统工程的产生、发展及应用

1. 系统思想的产生与发展

社会实践的需要是系统工程产生和发展的动因。系统工程作为一门学科,虽形成于 20 世纪中期,但系统思想及其初步实践可以追溯到古代。了解系统思想的产生与发展过程,有助于加深对系统概念、系统工程产生背景和系统科学全貌的认识。

1) 朴素的系统思想及其初步实践

自从人类有了生产活动以后,由于不断地和自然界打交道,客观世界的系统性便逐渐反映到人的认识中来,从而自发地产生了朴素的系统思想。这种朴素的系统思想反映到哲学上,主要是把世界当做统一的整体。

古希腊的唯物主义哲学家德谟克利特曾提出“宇宙大系统”的概念,并最早使用“系统”一词;辩证法奠基人之一的赫拉克利特认为“世界是包括一切的整体”;亚里士多德的名言“整体大于部分的总和”是系统论的基本原则之一。

虽然古代还没有提出一个明确的系统概念,没有也不可能建立一套专门的、科学的系统方法论体系,但对客观世界的系统性及整体性却有了一定程度的认识,并能把这种认识运用到改造客观世界的实践中去,中国在这方面尤为突出。

中国人做事善于从天时、地利、人和中进行整体分析,主张“大一统”、“和为贵”。

春秋末期的思想家老子曾阐明了自然界的统一性。

东周时代,出现了世界构成的“五行说”(金、木、水、火、土)。

公元前 6 世纪,中国著名军事家孙武在他的《孙子兵法》中,阐明了不少朴素的系统思想和运筹方法。该书共 13 篇,讲究打仗要把道(义)、天(时)、地(利)、将(才)、法(治)等 5 个要素结合起来考虑。

秦汉之际成书的中国古代最著名的医学典籍《内经》，包含着丰富的系统思想。它根据阴阳五行的朴素辩证法，把自然界和人体看成由金、木、水、火、土五种要素相生相克、相互制约而形成的有秩序、有组织整体。人与天地自然又是相应、相生而形成的更大系统。《易经》也被认为是朴素系统思想的结晶。

在古代的工程建设上，都江堰最具代表性和系统性。都江堰于公元前 256 年由蜀郡太守李冰父子组织建造，至今仍发挥着重要作用。该工程由鱼嘴（岷江分流）、飞沙堰（分洪排沙）和宝瓶口（引水）等三大设施组成，整个工程具有总体目标最优化、选址最优、自动分级排沙、利用地形并自动调节水量、就地取材及经济方便等特点。

2) 科学系统思想的形成

古代朴素的系统思想用自发的系统概念考察自然现象，其理论是想象的，有时是凭灵感产生出来的，没有也不可能建立在对自然现象具体剖析的基础上，因而这种关于整体性和统一性的认识是不完全和难以用实践加以检验的。早期的系统思想具有“只见森林”和比较抽象的特点。

15 世纪下半叶以后，力学、天文学、物理学、化学、生物学等相继从哲学的统一体中分离出来，形成了自然科学。从此，古代朴素的唯物主义哲学思想就逐步让位于形而上学的思想。这时的系统思想具有“只见树木”和具体化的特点。

19 世纪自然科学取得了巨大成就，尤其是能量转化、细胞学说、进化论这三大发现，使人类对自然过程相互联系的认识有了质的飞跃，为辩证唯物主义的科学系统观奠定了物质基础。这个阶段的系统思想具有“先见森林，后见树木”的特点。

辩证唯物主义认为，世界是由无数相互关联、相互依赖、相互制约和相互作用的过程所形成的统一体。这种普遍联系和整体性的思想，就是科学系统思想的实质。

2. 系统理论的形成与发展

从古希腊和中国古代的哲学家、军事家到近、现代许多伟大的思想家，都有过关于系统思想的深刻论述。但从系统思想发展到（一般）系统论、控制论、信息论等系统理论，是和近代、现代科学技术的兴起与发展紧密联系的。

系统论或狭义的一般系统论，是研究系统的模式、原则和规律，并对其功能进行数学描述的理论。其代表人物为奥地利理论生物学家贝塔朗菲。

控制论是研究各类系统的控制和调节的一般规律的综合理论，“信息”与“控制”等是其核心概念。它是继一般系统论之后，由数学家维纳在 20 世纪 40 年代创立的。

信息论是研究信息的提取、变换、存储与流通等特点和规律的理论。

从 20 世纪 60 年代中、后期开始，国际上又出现了许多新的系统理论。我国著名的科学家钱学森对系统理论和系统科学的发展有独到的贡献。

20 世纪下半叶以来，系统理论对管理科学与工程实践产生了深刻的影响。系统工程

学的创立,则是发展了系统理论的应用研究,它为组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用提供了一种有效的科学方法,又为系统理论的进一步发展提供了丰富的实践材料和广阔的应用天地。

3. 系统工程的发展概况

系统工程从准备、创立到发展的阶段、年代(份),重大工程实践或事件及重要的理论与方法贡献等如表 1-1 所示。

表 1-1 系统工程的产生与发展概况

年代(份)	重大工程实践或事件	重要理论与方法贡献
1930 年	美国发展与研究广播电视系统	正式提出系统方法的概念
1940 年	美国实施彩电开发计划	采用系统方法,并取得巨大成功
第二次世界大战期间	英、美等国的反空袭等军事行动	产生军事系统工程
20 世纪 40 年代	美国研制原子弹的“曼哈顿计划”	运用系统工程,并推动其发展
1945 年	美国空军建立研究与开发(R&D)机构,此即兰德(Rand)公司的前身	提出系统分析的概念,强调其重要性
20 世纪 40 年代后期到 50 年代初期		运筹学的广泛运用与发展、控制论的创立与应用、电子计算机的出现,为系统工程奠定了重要的学科基础
1957 年	H. Good 和 R. E. Machol 发表名为《系统工程》的著作	系统工程学科形成的标志
1958 年		提出 PERT(网络优化技术),这是较早的系统工程技术
1965 年	R. E. Machol 编著《系统工程手册》	表明系统工程的实用化和规范化
1961—1972 年	美国实施“阿波罗”登月计划	使用多种系统工程方法并获得巨大成功,极大地提高了系统工程的地位
1972 年	国际应用系统分析研究所(IIASA)在维也纳成立	系统工程的应用重点开始从工程领域进入到社会经济领域,并发展到了一个重要的新阶段
20 世纪 60 年代开始	“两弹一星”工程、三峡工程、高铁工程	系统工程在中国的研究与应用达到高潮

1.2 系统工程的研究对象

系统工程的研究对象是组织化的大规模复杂系统。而“系统”作为系统理论、系统工程和整个系统科学的基本研究对象,需要正确理解和深刻认识。

1. 系统的定义

系统(system)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、结构和环境的有机整体。

该定义有以下四个要点。

1) 系统及其要素

系统是由两个以上要素组成的整体,构成这个整体的各个要素可以是单个事物(元素),也可以是一群事物组成的分系统、子系统等。系统与其构成要素是一组相对的概念,取决于所研究的具体对象及其范围。

系统是由一些要素——系统的组成部分结合而成的,这些组成部分可能是一些元件、零件、个体,也可能是子系统(分系统)。小的系统由几个要素组成,一个钟表由几十个零件组成,一架飞机有几十万个零件,一个宇宙飞船有几百万个零部件,一座大城市算起来大约有几亿个要素。随着社会的发展与科学技术的进步,系统总是越来越复杂,组成部分的数量也越来越多。

应注意,往往一个系统作为独立的部分来看,它是一个完整的系统;但对于更大范围或者更高一级来说,它本身又是一个更大系统的一个组成部分。例如,人体中呼吸系统可以看做一个独立系统,而对“人”这样一个更大系统来说又是一个组成部分。常常把这种组成部分叫做“子系统”或者“分系统”。

2) 系统和环境

任一系统是它所从属的一个更大系统(环境或超系统)的组成部分,并与其相互作用,保持较为密切的输入输出关系。系统连同其环境一起形成系统总体。系统与环境也是两个相对的概念。

3) 系统的结构

在构成系统的诸要素之间存在着一定的有机联系,这样在系统的内部形成一定的结构和秩序。结构即组成系统的诸要素之间相互关联的方式。

例如,钟表由齿轮、发条、指针装配而成,但随便把一堆齿轮、发条、指针放在一起不能构成钟表,必须按各零件间的一定的结合关系装配起来才行。我国古代谚语“三个臭皮匠,顶个诸葛亮”,这是说几个平凡人组织起来集思广益的集体智慧是超过单独的几个人的简单相加的。但俗话说又说:“一个和尚挑水喝,两个和尚抬水喝,三个和尚没水喝”,为什么同样是三个平凡人,结果会如此迥异呢?这里的关键在于是否有组织。所以,系统是按照一定的组织方式结合的。

4) 系统的功能

任何系统都有其特定的功能。系统功能的实现受到其环境和结构的影响。

2. 系统的一般属性

1) 整体性

整体性是系统最基本、最核心的特性,是系统性最集中的体现。

具有相对独立功能的系统要素以及要素间的相互关联,是根据系统功能依存性和逻辑统一性的要求,协调存在于系统整体之中。系统的构成要素和要素的机能、要素的相互联系和作用要服从系统整体的目的和功能,在整体功能的基础上展开各要素及相互之间的活动,这种活动的总和形成了系统整体的有机行为。在一个系统整体中,即使每个要素并不都很完善,但它们也可以协调、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,也就不能称之为完善的系统。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。

2) 关联性

构成系统的要素是相互联系、相互作用的;同时,所有要素均隶属于系统整体,并具有互动关系。关联性表明这些联系或关系的特性,并且形成了系统结构问题的基础。

3) 环境适应性

系统的开放性及环境影响的重要性是当今系统问题的新特征,日益引起人们的关注。任何一个系统都存在于一定的环境之中,并与环境之间产生物质、能量和信息的交流。环境的变化必然会引起系统功能及结构的变化。系统必须首先适应环境的变化,并在此基础上使环境得到持续改善。管理系统的环境适应性要求更高,通常应区分不同的环境类(技术环境、经济环境、社会环境等)和不同的环境域(外部环境、内部环境等)。

系统的不断变化也是为了适应外界环境的变化,所以,环境适应性也可以算做系统的一个特征。

4) 系统的层次性

一个复杂的系统是由许多子系统(或者分系统)组成的,子系统可能又分为许多子系统。也就是说,系统是有层次的。例如,生命体就有细胞、组织、器官、系统(例如,生殖系统、消化系统、呼吸系统等)和生物体这几个层次,生态系统也有个体、种群、生物群落等层次,这就是系统的“层次性”。

除以上四个基本属性之外,很多系统还具有目的性等特征。

根据系统的属性,可以归纳出若干系统的思想或观点。比如,综合系统的整体性和目的性,可以归纳出整体最优的思想等。

3. 系统的类型

认识系统的类型,有助于在实际工作中对系统工程对象的性质有进一步的了解和分析。

1) 自然系统与人造系统

自然系统是主要由自然物(动物、植物、矿物、大气、水资源等)所自然形成的系统,像海洋系统、矿藏系统等;人造系统是根据特定的目标,通过人的主观意愿所建成的系统,如生产系统、管理信息系统等。实际上,大多数系统是自然系统与人造系统的复合系统。近年来,系统工程越来越注意从自然系统的关系中探讨和研究人造系统。

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基本要素所组成的系统称为实体系统;凡是由概念、原理、原则、方法、制度、程序等概念性的非物质要素所构成的系统称为概念系统。在实际生活中,实体系统和概念系统在多数情况下是结合在一起的。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,指导实体系统的行动或为之服务。系统工程通常研究的是这两类系统的复合系统。

3) 动态系统和静态系统

动态系统就是系统的状态随时间而变化的系统;而静态系统则是表征系统运行规律的模型中不含有时间因素,即模型中的量不随时间而变化,它可视做动态系统的一种特殊情况,即状态处于稳定的系统。实际上多数系统是动态系统,但由于动态系统中各种参数之间的相互关系非常复杂,要找出其中的规律性有时是非常困难的,这时为了简化起见而假设系统是静态的,或使系统中的各种参数随时间变化的幅度很小,而视同稳态的。也可以说,系统工程研究的是在一定时期、一定范围内和一定条件下具有某种程度稳定性的动态系统。

4) 封闭系统与开放系统

封闭系统是指该系统与环境之间没有物质、能量和信息的交换,因而呈一种封闭状态的系统;开放系统是指系统与环境之间具有物质、能量与信息的交换的系统。这类系统通过系统内部各子系统的不断调整来适应环境变化,以保持相对稳定状态,并谋求发展。开放系统一般具有自适应和自调节的功能。

1.3 系统的概念与特点

1. 系统的概念

用定量与定性相结合的系统思想和方法处理大型复杂系统的问题,无论是系统的设计或组织建立,还是系统的经营管理,都可以统一地看成一类工程实践,统称为系统工程(systems engineering)。

钱学森曾指出:“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,是一种对所有系统具有普遍意义的科学方法。”“系统工程是一门组织管理的技术。”

美国切斯纳(Chestnut)指出：“系统工程认为虽然每个系统都是由许多不同的特殊功能部分所组成，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。”

一般来说，系统工程是从总体出发，合理开发、运行和革新一个大规模复杂系统所需思想、理论、方法论、方法与技术的总称，属于一门综合性的工程技术。它是按照问题导向的原则，根据总体协调的需要，把自然科学、社会科学、数学、管理学、工程技术等领域的相关思想、理论、方法等有机地综合起来，应用定量分析和定性分析相结合的基本方法，采用现代信息技术等技术手段，对系统的功能配置、构成要素、组织结构、环境影响、信息交换、反馈控制、行为特点等进行系统分析，最终达到使系统合理开发、科学管理、持续改进、协调发展的目的。

2. 系统工程是一门交叉学科

系统工程是一门工程技术，但它与机械工程、电子工程、水利工程等其他工程学的某些性质不尽相同。各门工程学都有其特定的工程特质对象，而系统工程的对象，则不限于某种特定的工程物质对象，任何一种物质系统都能成为它的研究对象；而且还不只限于物质系统，它可以包括自然系统、社会经济系统、经营管理系统等。由于系统工程处理的对象主要是信息，并着重为决策服务，国内外很多学者认为系统工程是一门“软科学”。

系统工程在自然科学与社会科学之间架设了一座沟通的桥梁。现代数学方法和计算机技术等，通过系统工程为社会科学研究增加了极为有用的量化方法、模型方法、模拟方法和优化方法。系统工程也为从事自然科学的工程技术人员和从事社会科学研究人员相互合作开辟了广阔的道路。

钱学森曾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几个层次：首先是工程技术这一层次，其次是基础科学这一层次，最后通过进一步综合、提炼达到最高概括的马克思主义哲学。在此基础上，他又进一步提出了一个系统科学的体系结构。他认为，系统科学是由系统工程这类工程技术、系统工程的理论方法(如运筹学、大系统理论)等一类技术科学组成的新兴科学。

人们比较一致的看法是，系统工程学是以大规模复杂系统问题为研究对象，在运筹学、系统理论、管理科学等学科的基础上逐步发展和成熟起来的一门交叉学科。系统工程的理论基础是由一般系统论及其发展、大系统理论、经济控制论、运筹学、管理科学等学科相互渗透、交叉发展而形成的。

3. 系统工程的特点

系统工程既具有广泛而厚实的理论和方法论基础，又具有很明显的实用性特征。