

高等学校规划教材

系统工程 原理与应用

胡保生 彭勤科 编著



化学工业出版社

高等学校规划教材

系统工程原理与应用

胡保生 彭勤科 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面叙述系统工程的原理、方法和应用,包括系统的思想方法和观点、系统工程设计的原理和方法、系统工程的规划组织与管理、系统工程常用的优化方法和工具、系统工程与软件工程、信息技术与系统集成、系统工程应用和新的挑战。

本书内容较新,叙述中图文并茂,是反映国内外系统工程实践经验的一本教材,适合高等学校系统工程专业硕士研究生学位课程、自动化等专业本科高年级选修课以及各大公司或部门系统工程培训等使用,也适合有兴趣于系统工程的技术人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统工程原理与应用/胡保生,彭勤科编著. —北京:
化学工业出版社, 2007.5

高等学校规划教材

ISBN 978-7-122-00342-3

I. 系… II. ①胡…②彭… 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 060016 号

责任编辑:唐旭华

文字编辑:云 雷

责任校对:洪雅姝

装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张22¼ 字数614千字 2007年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

系统工程是一门实践性非常强的学科，我们虽然也承担或参与过一些系统工程项目，但毕竟实践机会少和经验不足。为此，对本书的编写我们做了大量准备工作，花费了大约两年的时间收集和阅读了国内外学者的系统工程著作和文献，并翻译了其中著名的两本著作（Sage 和 Kossiakoff）。在编写中，我们还借鉴了国内外系统工程教材、学术著作和文章的一些观点和论述。在此，向他们一并表示感谢！

因此，在一定程度上，本书可以说是国内外学者系统工程经验和精彩论述的一种集成。在这种集成的过程中，我们也提出了自己的观点，敬请读者和系统工程界的同仁们批评指正。

本书稿曾在 2006 年秋季西安交通大学系统工程专业硕士学位课程中试用，并做了进一步修改。在此谨向所有提出宝贵意见的同学和老师们致谢。

编著者

2007 年 4 月

目 录

1 绪论	1	6.3 系统可行性分析	58
1.1 系统工程的定义	1	6.4 系统的运行要求	58
1.2 系统工程的由来	1	6.5 维护和支持的概念	63
1.3 系统工程的若干标志性成就	5	6.6 技术性能度量	66
1.4 系统工程的作用和系统工程师	6	6.7 功能分析和分配	68
1.5 系统工程师的职业道德规范	9	6.8 系统折中分析	72
思考题与习题	10	6.9 系统规格	73
2 系统工程的对象	11	6.10 概念设计评审	74
2.1 系统的基本概念	11	思考题与习题	74
2.2 系统的特性	11	7 初步系统设计	76
2.3 系统的分类	13	7.1 子系统的设计要求	76
2.4 系统时代	18	7.2 开发、产品、过程和材料规格	76
思考题与习题	20	7.3 功能分析和分配	77
3 系统思想与方法	21	7.4 具体设计要求	83
3.1 系统思想	21	7.5 工程设计工具和技术	85
3.2 系统存在的形式	25	7.6 折中研究和设计确定	87
3.3 系统属性	26	7.7 设计评审、评估和反馈	88
3.4 系统方法	26	思考题与习题	90
思考题与习题	28	8 具体设计和开发	91
4 系统工程的理论基础	29	8.1 具体设计要求	91
4.1 系统论或系统学	29	8.2 设计的工程活动	92
4.2 钱学森对我国航天事业的贡献和对系统论的贡献	31	8.3 集成系统的各单元和活动	94
4.3 控制论和大系统理论以及钱学森对控制论的贡献	33	8.4 设计工具和辅助工具	95
4.4 运筹学与数学规划	36	8.5 设计数据、信息和集成	96
4.5 信息论	37	8.6 工程模型的开发	98
4.6 科学管理论	38	8.7 系统原型的开发	98
思考题与习题	40	8.8 设计评审、评价和反馈	99
5 系统工程的原理和方法	41	8.9 设计变动的加入	101
5.1 系统工程的定义和任务	41	思考题与习题	102
5.2 人造系统或工程系统的特点	43	9 系统设计专题	103
5.3 系统工程的方法	44	9.1 绿色设计	103
5.4 系统的生命周期工程	45	9.2 运行可行性设计	108
5.5 系统设计所要考虑的因素或问题	48	9.3 系统升级	124
5.6 系统综合、分析和评价的形态	51	9.4 风险管理	126
5.7 确认和处理生命周期的影响	53	思考题与习题	131
5.8 从系统工程中获得的效益	54	10 系统测试、评价和证实	132
思考题与习题	55	10.1 系统测试、评价和证实的要求	132
6 概念系统设计	56	10.2 系统测试和评价的类别	133
6.1 问题确定和需求辨识	56	10.3 系统测试和评价规划	136
6.2 预先系统规划	57	10.4 系统测试和评价的准备	137
		10.5 进行系统测试、数据收集和测试报告	138

10.6 系统改进	140	15 软件工程与系统工程	250
思考题与习题	141	15.1 软件工程的起源	250
11 系统工程的规划和组织	142	15.2 软件工程学的内容	251
11.1 系统工程项目规划	142	15.3 软件工程基本原理和软件生命周期	253
11.2 系统工程的管理计划	142	15.4 软件开发的瀑布模型	254
11.3 系统工程的组织	152	15.5 系统工程与软件工程的区别	255
思考题与习题	160	15.6 软件系统在系统工程中存在的形式	256
12 项目的管理、控制与评估	161	15.7 软件概念的开发:分析和设计	259
12.1 组织的目的和目标	161	15.8 软件的工程开发:编码和单元测试	264
12.2 外包和供应商的辨识	162	15.9 软件的集成和测试	268
12.3 项目的领导和指导	164	15.10 软件的工程管理	270
12.4 项目的评估和反馈	164	15.11 硬件与软件的协同设计	273
12.5 风险管理	170	15.12 软件发展的未来展望	274
思考题与习题	171	思考题与习题	275
13 系统工程常用的系统规划与优化		16 信息技术与系统集成	276
理论和方法	172	16.1 关于系统集成	276
13.1 系统优化的模型	172	16.2 现代通信和互联网	277
13.2 线性规划	175	16.3 网络化与网络智能	279
13.3 非线性优化算法	186	16.4 信息时代的矛盾和问题	281
13.4 动态规划	192	16.5 企业的信息技术和企业的发展与 变革	281
思考题与习题	195	16.6 信息技术与电子政务	292
14 系统工程常用的工具	197	16.7 信息技术与军事	293
14.1 功能流程方块图	197	16.8 信息技术与生活	296
14.2 IDEF 建模方法	202	16.9 信息安全与网络道德规范	297
14.3 统一建模语言 UML	208	思考题与习题	301
14.4 系统动力学法 (Systems Dynamics) 和 Dynamo 语言	217	17 系统工程应用举例	302
14.5 工作拆分结构 (WBS)	223	17.1 神五飞船系统工程	302
14.6 甘特 (Gantt) 图	226	17.2 计算机集成制造系统的设计与开发	308
14.7 关键路径法 (Critical Path Method, CPM)	229	17.3 Boeing777 开发案例	313
14.8 计划评审技术	231	17.4 笔记本电脑开发	318
14.9 图形评审技术	235	17.5 ERP 系统开发和供应链管理	321
14.10 德尔菲法 (Delphi Method)	238	17.6 事务管理系统开发	324
14.11 层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)	239	17.7 集群计算机系统开发	326
14.12 头脑风暴法 (Brainstorming)	244	17.8 流程工业的管控一体化	327
14.13 智力写作 (Brainwriting) 和群件 (Groupware)	246	思考题与习题	335
14.14 形态盒方法 (Morphological Box Approach)	248	18 系统工程的挑战性课题和应用	
思考题与习题	249	前景	336
		18.1 系统的系统	336
		18.2 反恐问题	338
		18.3 系统工程的应用前景	344
		参考文献	347

1 绪 论

1.1 系统工程的定义

通俗地说,系统工程就是人们系统地思考和借助现代工程的方法,来解决所面临的各种复杂问题的学问。

进一步讲,系统工程就是人们以系统的思想和观点、并借助现代工程设计和实施的方法,来解决现代社会日益增长的复杂经济、技术、工业、军事等系统发展问题的一门学科或专门知识。

再深入一点来说,系统工程是以大规模系统为对象,用系统的思想、观点和方法来对它进行分析和处理,并充分利用现代计算机、通信和自动控制技术的成果,借助现代工程的设计、步骤和方法来规划和提出一个或多个现实可行的方案。并用计算机仿真来预演这些方案,发现和解决可能存在的缺陷或问题,最后用系统工程的管理方法精心地组织其实施,从而能多、快、好、省地实现它。

系统工程的功能是指导复杂系统的工程。这里,指导的含义是:在以往经验的基础上导向或指明道路,即从可能的进程中为他人选择(指明)应遵循途径的过程。而工程则是为实际的目的应用科学原理——如设计、经济地去构造、高效运行的设备和系统。

系统工程与机械、电气、电子或其他传统的工程学科不同。它在于着重考虑系统的整体,指导和沟通各学科、集成和协调地应用各自领域的知识和专长来解决复杂的系统问题。

对于系统工程的更为专业和学术性的定义,将在后面作具体论述。

1.2 系统工程的由来

系统工程起源于20世纪40年代,逐步发展、形成于20世纪50~60年代。它是现代社会、工业和科学技术发展的产物,但它并不是突而产生的。因此,先简要回顾一下人类认识世界的过程。

1.2.1 人类如何认识世界

自有人类社会以来,随国家和军队的产生、社会分工的结果就出现了统治阶层及辅助他们的谋士人群,专门从事思考和处理国家治理、军队打仗和生产的对策,自然孕育着朴素的系统思想和系统的思维方法。

我国周代(公元前700~476年)的《易经》,就是一本至今还值得现代人们学习其道的经典著作。易经的卦,就是应对国家治理、军队打仗和生产等使之获得成功所应遵循的法则,即处理复杂事物的思想和方法,其中蕴涵了朴实和深刻的系统思想。

公元前6世纪的春秋时期,我国古代军事家孙武的《孙子兵法》,至今仍是我国乃至世界军事家和管理专家奉为必读的圣典。它对作战的不同层次、环境和方法做了系统的分析和运筹帷幄,蕴含了丰富的系统思想和方法。

在西方,古希腊哲学家德谟克利特(Democritus,公元前460~370年)的《宇宙大系统》的概念、赫拉克利特(Heraclitus,公元前535~475年)的《世界是包括一切的整体》以及亚里士多德(Aristotle,公元前384~322年)的名言《整体大于部分的总和》,就是系统思想的

基本原则。这些就是古代和中世纪认识世界的整体论的要点。

在古代的伟大工程建设上,公元前4000年美索波达密亚的水分配系统、公元前3300年埃及的灌溉系统、公元前312年的罗马的公路系统(起初修建了261km,以后修建了遍布地中海区域的80000km的硬质地面公路,主要为军事目的而建)以及我国公元前256年、秦昭襄王51年蜀郡太守李冰主持修建的都江堰水利工程就是应用朴素系统思想解决大规模工程问题的典范。

古代朴素的系统思想是对当时自然和农业社会活动经验的概括,当然有其原始性和局限性,并带有实用性与神话性结合的特点。

15世纪下半叶后,力学、天文、物理、化学和生物学等相继从哲学的统一体中独立出来,形成了自然科学的门类。以及从16世纪开始,以欧洲为首的工业革命逐步将人类社会从农业社会推向工业社会。人们主要使用还原论(或称部分论)的方法(即分析和演绎的方法)。还原论认为:各种自然现象都可以还原成一组基本的要素,各要素彼此不因外在因素而改变其性质。通过对各要素的研究可以推知整体现象的性质。古希腊的还原论思想和公理化方法经过弗兰西斯培根、笛卡儿和伽利略的继承和发扬,奠定了近代科学的认识基础。直到19世纪末、20世纪初,基于还原论的西方科学体系经过几百年的发展,建立了庞大而完整的科学体系,在它的基础上孕育出高度发达的工程技术和行之有效的管理制度,创造了空前繁荣的人类文明。

20世纪基础科学的三大发现和成就是相对论、量子论和混沌学,从微观和宏观尺度证实了还原论的局限性。数学上的重大发现哥德尔不完备性定理,从逻辑层次宣判了还原论统治地位的终结。爱因斯坦发现时间、空间、物质和能量乃至宇宙必须作为一个整体来研究,“物质告诉时空怎样弯曲,时空告诉物质怎样运动。”一旦割裂它们就会发生严重失真。牛顿世界物质与时空分离、时空的平均平直状态,只是忽略失真后的一种近似。量子世界的微观研究表明:一个整体无法非常确定地分为一些组成部分,更无法把这些组成部分非常确定地组成为整体。比如电子是粒子,同时又是波。即对于电子在原子中的位置和速度这两个基本量来说,还原论是失效的。这表明量子世界是一个非机械的、相互联系的、不可分割(还原)的世界。而混沌学研究告诉我们,牛顿世界只不过是广大世界的一个特例,更为广大的世界是牛顿力学无法解释的。

这些事实提示了科学的思维必须冲破还原论的束缚,必须补充以整体的观念,即将事物视为一个有机的整体,充分考虑其所有有关因素间的相互联系和变化的复杂性。整体论和部分论(还原论)的辩证联系和统一就引发了系统思维和系统论的发展,也反映了深化认识现代科学和社会大范围、大规模活动的复杂性的要求。20世纪中、后期以来,人类就开始以系统和辩证思想和观念来认识和改造世界。

1.2.2 人类如何改造世界

人类在与自然斗争的实践中认识世界,在认识世界后又来指导实践,如此反复来达到物质和文明的不断进步。实践—认识—实践的循环上升和提高,实践的效率(效益)不断提高和认识不断深化。我们在这里不讨论人类社会的发展、改革和进步问题,只回顾人类物质世界的近代发展和进步过程。

人类与自然斗争,是为了解决和提高自身的衣、食、住、行、文化和娱乐等需求。为此,就要千方百计地创造各种各样的工具来延伸或替代自己的体力和脑力,去省力和高效地利用和加工自然资源和资源。

人类从以刀耕火种、棍棒、石块为工具的狩猎和以兽皮、树叶裹身开始,进步到牛、马车拉犁、弓箭,再到手工作坊制作刀剑、犁耙、弓箭、车轮、马车、织布等,经历了从石器(几百万年)到铜器(5000~6000年)再到铁器(2800年)为工具的漫长时期。从14世纪到17

世纪上半叶,农业和手工业得到发展和繁荣。多于个人需要的粮食和手工产品成为交换用的商品,贸易和运输商品的需求、扩张领地和殖民地以及战争的要求,孕育了资本主义社会的基本要素。17世纪中叶到18世纪中叶欧洲各国资产阶级相继取代了封建势力,获得了政权。英国、法国和德国先后开始了第一次工业革命,其标志是蒸汽机取代了手工作坊加工机具的动力和纺织机与纺织业的兴起。蒸汽汽车和火车,以及铁路运输相继出现。欧洲从农业时代向工业时代、农业经济向工业经济转移。

19世纪70年代到20世纪初,以德国和美国为中心的第二次工业革命登上历史舞台。其标志为电动机和内燃机取代了蒸汽机,开始机械化和半自动化生产,人类进入电气时代。以蒸汽为动力的火车向以内燃机和电机为动力的机车发展。贝尔发明电话(1876年)、爱迪生发明电灯(1879年)并建立第一个中央发电站与照明电力系统,1903年莱特兄弟发明飞机。采掘工业、钢铁工业、石油和化工工业、机械和电气工业得到建立和发展。资本主义的生产力得到很大的发展,进入垄断阶段。由于商品大范围交流的需要,交通运输和远洋运输得到很大的发展。

以上这些就为人类社会和生产的大范围和大规模活动提供了实际可能和可行性。第一次和第二次世界大战就是交战各国综合利用这些实力的较量。

1.2.3 人类大规模改造世界的活动和系统工程的诞生和发展

第二次工业革命的科学技术和工业基础已为人类大范围和大规模的社会活动和生产活动奠定了基础。

1877年电话系统和1880年电力分配系统初次出现。

1930~1940年美国在研究发展广播电视时正式提出和应用了系统方法。第二次世界大战规模军事行动、军用物资的调运、防空作战等的需要,一批科学家参与、运用和发展了运筹方法。第二次世界大战中军事运筹学得到了发展。

1937年英国组成了多学科的团队来分析对德的防空系统。

1940年贝尔实验室开发微波通信系统中首次使用了系统工程的名称。

1945年贝尔实验室主持希腊胜利女神(Nike)防空导弹系统的开发(以后在美国30个洲300个地点部署该系统,服役了25年)以及研制原子弹的“曼哈顿”计划,均开始运用了系统工程的方法。

1945年8月第二次世界大战结束后,美国与苏联的冷战和争霸世界之争,导致了运用系统工程研究与开发先进军事系统和空间系统的巨大发展。

如由麻省理工学院(MIT)林肯实验室开始定义和发展的SAGE防空系统(1951~1980),它是第一个实时的、使用计算机的指挥和控制系统。由于系统规模大,涉及计算机系统和软件、雷达警戒和监视、通信以及武器系统的集成,需要一个新的组织来结合军方、工业和院校的特长,就在该实验室计算机系统部的基础上建立了MITRE公司,负责集成SAGE系统(包括分布在美国东部的24个监视中心、3个战斗中心,用远程电话线路连接到100多个防空作战单位、每个中心有一台MIT于20世纪50年代开发的Whirlwind计算机、实时计算的程序处理数据并向100多个作战单位和武器系统发送控制信息)。这方面的经验使得MITRE公司成为系统工程(特别是军事系统工程)这个新学科的先驱者之一。

拉莫-乌特来奇公司(Ramo-Wooldridge Convair-Consolidated Vultee Aircraft Corporation——即后来的Convair Division, General Dynamics Corporation)系统承包商的ATLAS洲际弹道导弹计划(1954~1964)。1953年美国空军正式向Convair公司授权开发ATLAS计划。1959年起正式部署为美国第一代洲际弹道导弹武器系统。

1958年美国将“计划评审技术(PERT)”应用于北极星导弹核潜艇的研制工程,使研制周期缩短了约1/3。

1961~1972 年美国实施的“阿波罗”登月计划广泛使用了多种系统工程方法,耗资 200 亿美元、超过 20 万人的协作,取得了举世瞩目的成功。

美国加州理工学院喷气推进实验室(JPL)成立,着重应用系统工程于大型和复杂航空航天项目的研究开发。第二次世界大战中为美国空军研究应用于飞机的火箭推进器。战后为美国陆军研究远程火箭,由于火箭系统涉及推进器、燃料系统、制导系统、电子系统和负荷等,需要各种专业的工程师协作来获得整体系统的最优解,就自然组成系统工程的团队。在“阿波罗”登月计划中,JPL 应用了系统工程总体优化的方法:从概念、设计、制造到运行,通过目的确定和问题陈述、目标和准则制定、系统综合、系统分析、系统选择和系统实施等步骤。在项目管理中,应用了保证设计评审系统各部分、内外部接口、比较测试和分析、质量和可靠性、项目成本和进度等措施,保证了维纳斯(Venus)发射间隔期为 25 个月。1965 年后 JPL 将其系统工程研发典型项目的经验应用于民用系统,如 Virginia Morgantown 城市公共交通运输系统项目的初步设计。论证了计算机控制的全自动化运输系统的技术、运行和经济的可行性,该系统于 1974 年 11 月完成和开始运行。又如 JPL 的 Martin 和 Luther, Jr. 与 General Hospital 合作,于 1970 年起进行了洛杉矶城市保健系统的系统工程分析和规划。

系统工程的实践导致了所用原理和方法的归纳和总结,系统工程的论著开始出现。1957 年 H. Good 和 R. E. Machol 的《系统工程》、1962 年 A. D. Hall 的《系统工程方法论》、1965 年 R. E. Machol 编著的《系统工程手册》、1965 年 Chestnut. H 的《系统工程的工具》、1966 年美国空军的《系统工程手册》、1967 年 Chestnut. H 的《系统工程方法》和 A. W. Wymore 的《系统工程的数学理论》等纷纷出版。从 1964 年开始,美国有 9 所大学开设系统工程课程。1971 年美国成立了国防系统管理学院,制订出如何指导复杂项目的课程计划,系统工程是该计划的核心课程。美国加州理工学院于 1971 年举行了系统工程的一系列讲座,回顾和总结他们在航空和空间系统工程领域的经验,并探讨了将系统工程方法应用于社会组织和社会系统等问题。

这些标志了系统工程作为一门学科正式诞生和发展。以后,一系列系统工程的标准的制定、期刊的出版、国际应用系统分析研究所的成立(1972 年)、IEEE SMC 专业学会的建立和国际系统工程委员会(INCOSE)成立,则标志了系统工程开始走向成熟。

1.2.4 系统工程在中国

系统工程在中国的发展和应用开始于 1956 年,钱学森创建了我国第一个运筹学研究组并在国防部五院创建了第一个军事运筹研究机构——作战研究处,开辟了系统工程在我国武器装备规划中的应用。1962 年,钱学森倡导参照 PERT 开始应用计划流程图——苹果树挂图管理我国火箭导弹技术的研究和开发,取得了极大成效。系统工程原理和方法于 20 世纪 50 年代下半叶和 60 年代初引入我国,并在军事领域开始应用。

1976 年文化大革命结束后,迫切需要采用系统工程来指导恢复和发展国民经济。以钱学森为首的一批学者和专家以及我国几所大学的教授们倡导应用系统工程方法来研究和规划国民经济恢复和发展的重大问题。1978 年 9 月 27 日,钱学森、许国治和王寿云在文汇报发表题为《组织管理的技术——系统工程》和西安交通大学建议教育部培养系统工程人才(从 1978 年起有西安交通大学、清华大学、天津大学、华中工学院、大连工学院和华东化工学院 6 所大学开始系统工程硕士研究生的培养)。在一批学者、专家和教授们的推动下,1979 年 10 月在北京召开的自动化大会上一致建议成立中国系统工程学会,1980 年 11 月得到批准正式成立。

从此以后,系统工程在解决我国许多领域的重大问题中发挥了巨大作用,取得了很好的效果。高层政府和管理部门、大公司和企业极为重视系统工程,并纷纷建立相应的系统工程机构或部门来谋划和协助决策各自的重大规划、任务、工程项目和产品。

1.2.5 系统工程和系统理论的新发展

进入 21 世纪以来,信息网络的全球化和国际化的发展,系统工程面对的系统,其规模和复杂度越来越大。系统工程的传统原理和方法已很难完美地指导这种复杂大系统的研究和开发,迫切需要有系统理论的指导。系统学或系统理论的新论点和学说就开始涌现出来。

以钱学森为首的一批我国学者专家归纳总结了我国的系统工程实践,并分析和借鉴了国外的系统论,提出了许多新的系统观点和理论原则,并提出了发展系统科学和系统论的艰巨任务。关于系统科学和系统论,将在第 3 章中专门予以介绍。

1.3 系统工程的若干标志性成就

几乎没有例外,现代社会中各种各样的复杂系统,都是应用系统工程方法的产物。如现代流程和制造工厂的设计和运行管理、空中交通管制系统、机票预定系统、银行支付和结算系统、公安人口查询系统、为反恐和防恐的签证系统、全国和全世界范围联网的图书馆图书查找系统等,以及现代飞机和汽车等复杂产品的设计与制造,或者各种为大众服务的系统等,确实是不胜枚举。

在历史上就有应用了系统工程而具有里程碑意义的大系统,如 1969 年 7 月 21 日美国阿波罗登月计划的成功实现。整个计划前后经历 11 年,涉及了 2000 亿美元和 200000 人的参与及协同工作,是现代系统工程创新和创造性应用的典范。它涉及了登月车(图 1.1)和土星 V 火箭的制造和阿波罗发射入轨(图 1.2)、以及宇航员在月球上的行走和返回地球等。

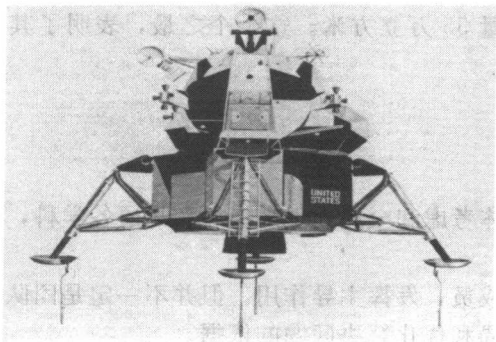


图 1.1 阿波罗登月车

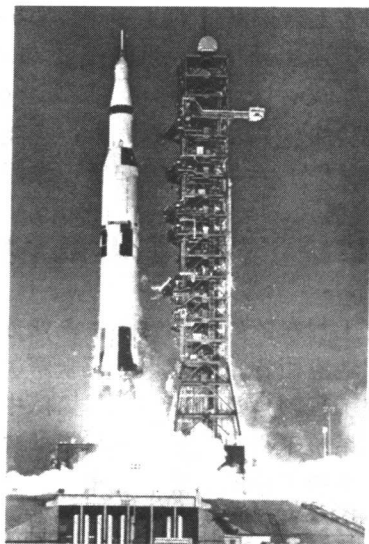


图 1.2 阿波罗开始升空

在我国,2003 年 10 月 15 日 9 时发射升空,绕地球 14 圈后于 10 月 16 日返回的第一颗载人宇宙飞船——神舟五号。并于 2005 年 10 月 12 日发射,遨游太空 5 昼夜,绕地球 17 圈后于 10 月 17 日返回地球的神舟六号(图 1.3)。这种载人航天工程是我国航天史上规模宏大和高度集成的系统工程。它涉及了全国 1300 多个研究机构和 3000 多个工厂和协作单位,以及几十万人的协同工作。

长江三峡水利枢纽工程是世界上从未有过的巨大水利工程,从其论证开始、到设计、施工、直到蓄水后库区城镇的迁移等,均是浩大的系统工程(图 1.4)。

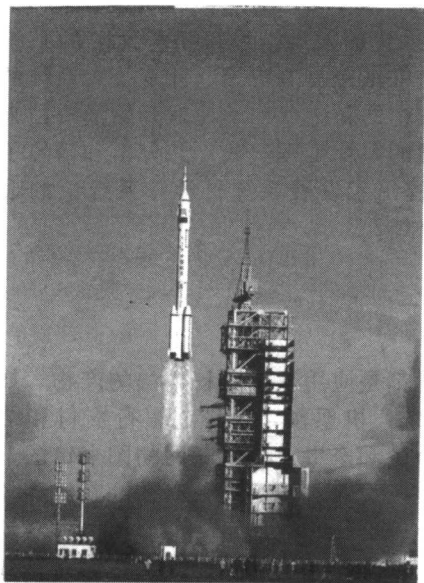


图 1.3 神六发射升空



图 1.4 长江三峡大坝在部分使用中

三峡水利工程创造了十项世界记录：①水电站装机容量为 1820 万千瓦；②建筑规模最大（坝轴线全长 2309m、泄流坝段长 483m、水电机组 26 台——每台 70 万千瓦、双线五级船闸和升船机；③土方挖掘量约 1.34 亿立方米、混凝土浇筑量 548 万立方米；④施工期截流流量 $9010\text{m}^3/\text{s}$ 、施工导流最大洪峰流量 $79000\text{m}^3/\text{s}$ ；⑤船闸双线五级、总水头 113m；⑥升船机可过船吨位 3000t；⑦水库移民 120 万；⑧泄洪能力 $10.25\text{万立方米}/\text{s}$ ；⑨水库总储量 393 亿立方米、防洪库容 221.5 亿立方米；⑩混凝土月浇筑量 55 万立方米。这十个之最，表明了其中系统工程发挥了巨大的组织和管理作用。

1.4 系统工程的作用和系统工程师

系统工程在解决现代复杂系统任务中，着重整体考虑和全局处理来指导和沟通各学科，集成和协调地应用各自的知识专长来解决问题。

系统工程师是复杂工程项目团队中不可缺少的成员，发挥主导作用，但并不一定是团队的领导者。系统工程师为项目领导者的决策，提供全局和优化解决问题的依据。

(1) 系统工程的力量

如果力量可以用人的权威或金钱来衡量，那么作为系统开发团队成员的系统工程师的力量，就似乎很小。但是，如果力量是用对系统设计和其主要特性的影响以及对系统开发成败的影响来衡量的话，那么系统工程师就较项目领导者或其他专业工程师可能更为有力量。这种力量来源于他们的知识、技能、看法或处事态度。

(2) 多学科知识的力量

一个复杂系统的开发项目，需要有不同学科几十个专家的集体努力来开发和产生一个成功的新系统。每个学科的专家有他们自己的语言和专门词汇来表达和传递对其他领域专家来说、未必能理解的特殊意义。这些语言还得到专家们各自业务的知识库的支持。这些知识库包括每个学科的特殊材料的描述、处理方法和大量关系，其中许多要用数学术语或方法来表达。这些知识库对其他学科的人来说，是不容易理解或甚至不相干的。

这种多学科参与者的集合,不可能成功地集体开发一个新系统,而是要由系统工程师来提供一种联系,使这些不同专业人员的群体能运作成为一个团队。系统工程师通过多学科知识的力量,来达到这一点。这意味着系统工程师要有涉及系统的多学科知识,能理解专家们的语言、辨别和解释他们的问题、并对他们的集体努力做必要的沟通。理解不同专业语言和使人们合作工作的能力,使系统工程师在开发系统中扮演一种中心和决定性的角色。

这里还要指出,与一个给定领域的专家进行有效交互所需要的学科知识的深度,是此领域知识深度的很小一部分。在一个给定技术领域中,人们必须掌握许多新术语,但最常用的往往只有十来个,而不是上百个。而且一旦弄清语义的不同后,就会发现不同学科间有许多共同的原理和许多相似的关系。例如,在通信中,关系到信号、噪声、天线增益、接收机灵敏度和其他因素的方程,相似于声学中的类似关系。

这种事实意味着一个系统工程师,并不需要花费终生来变成有关领域的专家,而只要通过有选择的阅读,特别是与这些领域中有学识同事们的讨论来积累有关领域的工作知识。重要的是要知道哪些原理、关系、术语等在系统层次上是重要的和哪些是要具体了解的。多学科知识的力量如此之大,因此对系统工程师来说很值得花时间来学习和积累。

(3) 系统工程与传统的工程学科

从以上阐述可以看出,系统工程在以下几方面与机械、电气和其他工程学科有所不同。

① 系统工程注重系统的整体——它强调整体的运行。它从外部,即从它们与其他系统和环境的相互作用来看系统,同时也从内部来看系统。它不仅关注系统的工程设计,而且关注那些重大制约设计的外部因素。这些因素包括识别用户的需求、系统的运行环境、接口系统、后勤支持要求、运行人员的能力以及应该正确反映在系统要求文件中 and 有助于系统设计的其他因素。

② 系统工程的主要目的是去指导,但这并不是指系统工程师自己在系统设计中不起关键作用。相反,系统工程师负责领导和开发一个反映用户需求的新系统的功能设计。在此阶段的重要设计决策,并不如传统工程科学那样,完全以量化的知识为基础,而往往必须依赖平衡各种无共同尺度的量和利用各种学科经验的定性判断,特别是在涉及新技术时。

③ 系统工程沟通各传统的工程学科。复杂系统中有各种各样的单元,在其设计和开发中,需要包括不同工程学科的知识和专长。为了使系统能正确运行,每个系统单元必须与一个或多个其他单元正确地联合作用。这些相互关联功能的有效作用,取决于分别设计的各单元件之间、在物理和功能上相互作用的复杂集合。因此,各种单元不能分别独立地进行工程设计,然后简单地装配形成一个工作的系统。更确切地说,系统工程师必须指导和协调各单元的设计,必须保证系统各单元间的相互作用和接口是相互兼容的和相互支持的。当各系统的元件是分别由不同组织所设计、测试和提供时,这样的协调就特别重要。

(4) 作为一门专业和职业的系统工程

正如前面在系统工程的由来中指出,系统工程较许多传统工程学科的形成要晚得多。系统的概念和方法在 1940 年前后才陆续涌现,到 20 世纪 50~60 年代才刚成熟而形成一种尚未得到广为认知的专业。

虽然在现代社会中,复杂系统日益增多和流行,但在系统开发中,系统工程的重要作用 and 系统工程作为一种职业,却未得到广泛承认。它首先并主要在专门从事大系统开发的那些公司里才得到确认。许多这些公司建立了系统工程部门,并在所从事的业务过程中,区分出系统工程师。

确认以系统工程为职业的缓慢,其主要原因可能是因为它不符合传统的工程学科。工程学科建立在定量关系上,遵守物理定律、材料、能源或信息的可测性质。而反过来,系统工程主要处理其中有不完整知识的那类问题,其中变量不遵守已知的方程式,并且其中必须在包含不

相称属性的冲突目标间做出折中或平衡。缺少定量知识的基础,实际上就抑制了系统工程建立成为一门独特的学科。

虽然存在这种障碍,但自 20 世纪 60~70 年代以来,系统工程在工业和政府中已被确认为迫切需求,政府和工业部门中大多建立起自己的系统工程机构,在许多大学中已经建立系统工程硕士学位的教学计划,有的大学还设立了博士培养计划。并且,系统工程已成为工程师继续教育的一个主要组成部分,少数大学还为大学生提供系统工程的学士学位。

人类社会的任何有目的活动,无论其大小及复杂程度,都必然是由在一定约束条件下由一系列前因后果关系的事件所组成。这些事件可大体分为事务型和技术型的事件。对事务型的事件进行人为加入的干预,一般称为“管理”。对技术型的事件进行人为加入的干预,一般称为“控制”。因此,有人认为:系统工程是一门管理科学。也有人认为:系统工程是一门控制科学。我们认为:对系统性的事物进行“管理”或“控制”都是人为的干预,只是事物的不同类型和人们专业的偏好不同,而将其归属不同而已。根据国外和国内的惯例,将系统工程作为“控制科学与工程”这一一级学科的一门二级学科是合宜的。

系统工程作为一种职业的标志,是最近已在形成一个职业学会——国际系统工程委员会(International Council on Systems Engineering, INCOSE),在我国于 1980 年 11 月成立了中国系统工程学会。这个学会的主要目的就是促进系统工程的研究和教育,自然确认了系统工程为一种职业。

(5) 系统工程的挑战

人们不愿意成为一个系统工程师的主要因素,是他们要从已有的学科偏离到十分不同的、复杂的和不确定的技术实践。需要投入时间和精力来大大扩充自己的工程基础、学会沟通和管理技巧以及发展与个人原来职业(专业)选择很大不同的趋向和爱好。

由于上述原因,考虑系统工程为职业(专业)生涯的一个工程师,会得出结论:道路是困难的、没有明显的回报,而且并不十分有吸引力。很明显,在传统工程学科中所进行的大量学习和得到的经验,将用处有限;只有少量的工具和定量关系会有助于做决策。而代替的问题是含糊的、抽象的和无视其有无确定解的。而且可能很少有机会确认个人的成就甚至个人付出的劳动。对一个系统工程师来说,成功是由项目或计划明显困难的程度来度量的,而不是成功的壮观如何。

(6) 系统工程的吸引力是什么?为什么有出色才能的人会奉献终身于这种职业?

对这两个问题的直接回答是,吸引力和乐于终身奉献于系统工程,就在于它的挑战性、而不是其直接回报。

系统工程师处理系统开发过程中的最重要问题。他们并不从事设计部件或零件,但设计整个系统的结构和技术方法。他们优先地与客户就系统需求问题一起工作,保证在平衡各种技术时、适当地权衡不同的各种系统属性。他们决定哪些风险值得去冒和哪些不值得去冒,以及如何防范风险来保证计划的成功。

由系统工程师来拟定出开发计划的进程,它规定了按此进程要执行的测试和仿真的形式和时间。他们是系统性能和系统可承担性(即在资金、时间和空间上负担得起)的目标、如何能同时达到的最终权威。

当开发计划中出现非期望的问题(它们经常会发生的)时,又是系统工程师来决定如何解决它们。他们决定对此问题是否需要全新的方法、是否需要加强工作来完成此目标、是否系统的全部不同部件需要改进来补偿所产生的问题、或是否能降低指标来缓解这个问题。

系统工程师获得他们指导系统开发的能力和地位,不是从他们在组织中所处的地位、而是来自他们对系统整体、其运行的目的、其全部部件如何一起工作、开发中全部技术因素如何进入的优越状态以及他们驾驭复杂计划通过重重困难达到成功结局的经验。

(7) 系统工程师的特质和引人之处

适合从事系统工程事业的人选,是在大学时有良好的数学和理科的基础和成绩。事实上,就像第二次世界大战表明的,许多物理学家或化学家发展成为出色的系统工程师。

一个系统工程师需要在一个多学科环境下工作,并能抓住有关学科的实质。也就是这种才能,十分有助于更容易学习新学科的基本知识和发展沟通的本领。系统工程师应有一种创造的天赋和必须爱好解决实际问题。对工作或职业的兴趣应大大高于对职位晋升的兴趣。系统工程更多是一种挑战,而不是晋升的捷径。

从一些成功的系统工程师身上,可以找到下列共同的特质:

- ① 喜爱学习新东西和解决问题;
- ② 爱好挑战;
- ③ 是未验证断言的怀疑者;
- ④ 对新思想、新观念无偏见和开放;
- ⑤ 在科学和工程方面有坚实的基础;
- ⑥ 在一个专业领域中已表现出技术上的成就;
- ⑦ 在几个工程领域有丰富的知识;
- ⑧ 能很快采取新思想和新信息;
- ⑨ 有较好人际关系和沟通的技巧。

1.5 系统工程师的职业道德规范

道德观是指在对客户服务时,不应有感情上的卷入或纠缠以及形成一种利害关系。规范和标准是指条理化地在职业范围内使专业人员能遵守和维护的规范。一般来说,职业人员应忠于其职业的准则。通常,也期望其他与自己有雇佣关系的人们,也同样遵守这些准则。

道德规范问题在系统工程中,也如在其他职业中那样,十分重要。由于系统工程是一门独特的学科,它的实践活动是高度集成的和跨越许多单位或领域;它要代表广大利益持有人的利益,而不仅是雇主或客户的利益;它在广大国际舞台上运作,那里价值系统、信念和习俗是十分不同的。系统工程的实践可能会导致重大的社会和环境的影响或后果,而必须考虑或减轻这种影响和后果。因此,系统工程师的行为规范更显得重要。

目前,在我国尚无规定或正式颁布的系统工程师职业道德规范。仅有中国机械工程师学会制定试行的《机械工程师职业道德规范》可供参考。现在,国际系统工程委员会(INCOSE)已拟定了系统工程师的道德规范。对进入系统工程专业学习和将来成为系统工程师的学生来说,了解作为系统工程师的基本职业道德规范的要求,是基本和重要的条件之一。

国际系统工程委员会提出的系统工程师职业道德规范如下。

(1) 基本原则

- ① 要诚实和公正;
- ② 保持高度的廉洁和诚信,并跟上学科知识的发展与进步;
- ③ 努力提高工程职业的能力和声望;
- ④ 支持本学科的教育机构、职业协会和技术学会。

(2) 对社会和公共设施的基本责任和义务

- ① 捍卫公众利益和保护环境、安全和福利,免受工程活动和技术产物的影响。
- ② 对自己的活动和工程结果承担责任,包括接受道德的检查和评估。
- ③ 主动减少或避免不安全的实践。
- ④ 利用整体系统观点和对系统接口理解所赋予的知识来处理风险。

⑤ 促进理解、执行和接受慎重的系统工程的措施。

(3) 实际的守则

① 要合法、正直、诚实和负责任地行动。

② 尊重、保护和维护别人的知识产权。

③ 遵守全部法定的合同和协议。

④ 公平地对待所有委托人。

⑤ 给出慎重的建议。要真实地、客观地和保持你职业和技术上的诚信。

⑥ 要尽你的能力来提供努力的和充分的服务。

⑦ 要尊重赋予你的信任和权力。

⑧ 避免利害冲突及其出现。

思考题与习题

1.1 请自己写出本章的小结。

1.2 请列举一、两个你所知道的我国应用系统工程方法的现代大工程项目成就，并做简要描述。

1.3 从一份最近的报纸或杂志，选择一篇中等长度、写得好的、关于有争议社会或技术问题的文章。将这篇文章按照本章提出的系统工程框架，将问题“剪辑”成能表达的程度，列出问题的各种元素。你的表达是否有助于较好理解这个有争议的问题？

1.4 系统一词以多种多样的含义被使用。它们包括方程式系统、控制系统、通信系统、银行系统、指挥和控制系统以及系统工程。试讨论在每种含义中系统的意义，为什么它们每一个被叫做系统？

1.5 前面问题中所用的词“系统”，意思是“产品系统”或“服务系统”，这个词-系统也可以为过程使用，描述通常叫做系统的一些过程。何谓集成过程和产品？是否它们也适合叫做系统？

1.6 请写出一个其中发生道德问题情况的简单研究案例，以及它们是如何解决的。请描述一个情况是以正面利用道德考虑来解决的，另一个其中违反了道德准则。

2 系统工程的对象

如第1章所述,系统工程所处理的对象是大系统或复杂系统。而且,现代社会中各种各样的复杂系统,几乎都是运用系统工程的产物。复杂系统是众多简单或小系统联结而成的系统。本章将先讨论系统的基本概念和特性,然后讨论复杂系统的类别和挑战性的问题。

2.1 系统的基本概念

系统概念来源于人类在长期改造世界中认识事物因果关系的一个飞跃。人们做任何一件事,必有其前因和后果,这就是一个最小的原始系统。因此,系统可以认为是“有因果关系的一系列事物”,即相关事物的群体或集合。这种复杂的大集合或大群体,就是复杂系统或大系统。

在学术界对系统有各种定义,对系统有不同的解释。这里举出著名的几个,供我们深入理解系统的含义。

钱学森对系统的定义是:系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的具有特定功能的有机整体。

国际系统工程委员会的系统工程手册指出:系统是一组交互作用的、并加以组织来达到某些目的的事物。

国内一般教科书上认为:系统是由两个以上有机联系、相互作用的要素组成,具有特定功能、结构和环境的整体。

2.2 系统的特性

系统在宇宙中无处不在,大到宇宙本身,小到原子都是系统。系统起初以自然形式出现,随人类的出现,各种人造系统就诞生了。直到最近才开始以科学的方法理解自然和人造系统的基本构造(结构)和特性。

系统是组成一个复杂或单一整体的各单元或零件的集合体或结合,例如一条河流系统或一个运输系统;相关部分的任何集合,例如货币流通系统;在特定知识或思想领域中的事实、原理或学说的有序和广泛集合,例如哲学系统;各种方法或复杂计划或手续的一种协调体,例如组织和管理系统;或其他任何有规则的特殊方法或手续计划,例如记分、计数或度量系统。并不是项目、事实、方法或手续的每种集合都是系统。一个房间中物件的任意安排,可能组成物件间一个确定关系的集合,但它不是系统,因为缺乏统一性、功能关系和有用的目的。

系统由部件、属性和关系组成。它们可以描述如下。

① 部件是系统的运行部件,由输入、过程和输出组成。每个系统部件可以假设有许多值(量)来描述某种控制动作和一个或多个限制设定的系统状态。

② 属性是系统部件的性质或可辨认的征兆,这些属性用来描述系统的特征。

③ 关系是部件与属性间的联系。

系统是一组相互关联的部件,为某一共同目标或目的而一起工作。这组部件有以下特性。

① 此组的每个部件的特性和行为,对整个组的特性和行为有影响或作用。

② 此组的每个部件的特性和行为,至少有赖于此组中一个其他部件的特性和行为。

③ 部件的每个可能的子集也具有上述两个特性,部件不可能划分为独立的子集。