

高等学校教材

系统工程 原理及应用



陈队永 主编

XITONG
GONGCHENG
YUANLI JI YINGYONG

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校教材

系统工程原理及应用

陈队永 主编

中国铁道出版社

2014年·北京

内 容 简 介

本书为高等学校教材,主要介绍了系统工程的基本概念、原理和方法应用。结合多年本科教学实践,重点介绍了系统分析、系统预测、系统评价、网络计划技术和系统决策等的基本原理及其应用,理论联系实际,应用性突出。

本书适用于本科应用型人才培养,可作为管理工程、项目管理、工程管理、工商管理以及相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。

图书在版编目(CIP)数据

系统工程原理及应用/陈队永主编. —北京:中国铁道出版社,2014. 2

高等学校教材

ISBN 978-7-113-17859-8

I. ①系… II. ①陈… 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(2013)第 302120 号

书 名:系统工程原理及应用

作 者:陈队永 主编

策 划:刘红梅

责任编辑:刘红梅 编辑部电话:010-51873133 电子信箱:mm2005td@126.com

封面设计:郑春鹏

责任校对:胡明锋

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京大兴新魏印刷厂

版 次:2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:16 字数:413 千

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-17859-8

定 价:34.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010) 51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010) 51873659,路电(021) 73659,传真(010) 63549480

前 言

系统工程是系统科学的一个分支,是系统科学的实际应用,是一门高度综合性的管理工程技术。系统工程以大规模复杂系统为对象,从系统的整体观念出发,研究各个组成部分,分析各种因素之间的关系,运用定性与定量分析相结合的方法,寻找系统的最佳方案,使系统总体效果达到最优。

我国著名科学家钱学森曾指出:“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,是一种对所有系统都具有普遍意义的方法”;“系统工程是一门组织管理的技术”。

系统工程作为一门组织管理的技术,在我国工程建设、生产管理、商业经营、资源利用、环境保护、经济体制改革和科学研究等诸多领域均已取得了显著成效,应用领域日益广泛,其重要作用已被人们广泛认识和接受,在我国社会经济建设过程中必将发挥越来越重要的作用。

结合作者多年本科教学实践,本书主要介绍系统工程的基本概念、原理和方法应用。重点介绍了系统分析、系统预测、系统评价、网络计划技术和系统决策等的基本原理及其应用,尽量做到理论联系实际,突出应用性。全书共分为9章,主要内容如下:

第1章绪论,介绍了系统、系统工程、体系和系统科学体系的基本概念。

第2章系统工程方法论,介绍了处理复杂系统的基本观点、以霍尔为代表的硬系统工程方法论、以切克兰德为代表的软系统工程方法论、以兰德公司为代表的系统分析方法论、以钱学森为代表的系统集成方法论以及物理—事理—人理系统方法论。

第3章系统分析,介绍了系统分析的基本概念、系统环境分析、系统目标分析和系统结构分析。

第4章系统建模,介绍了系统模型的概念和系统建模主要方法。

第5章系统预测,介绍了系统预测的概念,定性预测方法中的专家会议法和德尔菲法,定量预测方法中的时间序列分析预测、灰色模型预测、回归分析预测和马尔可夫预测。

第6章系统评价,介绍了系统评价的概念、评价指标综合的主要方法、层次分析法和模糊综合评价法。

第7章系统网络计划,介绍了网络计划的概念、双代号网络计划、单代号网络计划、网络计划优化和网络计划技术的应用。

第8章系统决策,介绍了决策的概念、风险型决策、不确定性决策、效用理论在决策中的应用和对策分析。

第9章系统管理,介绍了战略研究与管理、路线图、网络化管理和矩阵式管理的基本概念和主要方法。

该书定位于本科应用型人才培养,可作为高等院校交通工程、交通运输、管理工程、项目管理、工程管理、工商管理以及相关工程技术专业的教材,也可作为其他相关学科、专业教学使用。

本书由石家庄铁道大学陈队永主编。各章编写分工为:第1章、第5章、第6章和第7章由石家庄铁道大学陈队永编写;第2章由石家庄铁道大学张慧丽编写;第3章由石家庄铁道大学康拥政编写;第4章由石家庄铁道大学郭倩倩编写;第8章由衡水市交通运输局贾世东和衡水市哈院王琛编写;第9章由石家庄铁道大学孙幸成编写。全书由陈队永进行统稿与审校。

本书得到了教育部高等学校特色专业建设点(交通工程,项目号:TS11283)、河北省高等教育教学改革研究项目(项目号:2012GJJG083)和高等学校专业综合改革试点项目(交通工程)的资助。在编写和出版过程中,还得到了石家庄铁道大学黄守刚的大力支持和帮助。在此一并表示诚挚的谢意。

在本书的编写过程中,参考了大量的相关文献和资料。由于所参考的文献和资料较多,只能将主要的文献列于书后。在此谨向所有文献和资料的作者表示衷心感谢和敬意。

限于时间和编者的水平,书中不妥和错漏之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编者
2014年1月

目 录

1 绪 论	1
1.1 系统概述	1
1.2 系统工程	4
1.3 体系与体系工程	8
1.4 系统科学体系	12
复习思考题	17
2 系统工程方法论	18
2.1 方法与方法论	18
2.2 处理复杂系统问题的基本观点	18
2.3 以霍尔为代表的硬系统工程方法论	20
2.4 以切克兰德为代表的软系统工程方法论	23
2.5 以兰德公司为代表的系统分析方法论	25
2.6 以钱学森为代表的综合集成方法论	27
2.7 物理—事理—人理系统方法论	29
复习思考题	30
3 系统分析	31
3.1 系统分析概述	31
3.2 系统环境分析	35
3.3 系统目标分析	38
3.4 系统结构分析	40
复习思考题	45
4 系统建模	46
4.1 系统模型概述	46
4.2 系统建模方法	51
复习思考题	55
5 系统预测	57
5.1 系统预测概述	57
5.2 定性预测方法	61

5.3	时间序列分析预测	66
5.4	灰色预测——GM(1,1)模型	72
5.5	回归分析预测	76
5.6	马尔可夫预测	90
	复习思考题	97
6	系统评价	100
6.1	系统评价概述	100
6.2	评价指标综合的主要方法	107
6.3	层次分析法	117
6.4	模糊综合评价法	131
	复习思考题	141
7	系统网络计划	143
7.1	概 述	143
7.2	双代号网络计划	145
7.3	单代号网络计划	165
7.4	网络计划优化	176
7.5	网络计划技术应用举例	184
	复习思考题	192
8	系统决策	195
8.1	决策分析概述	195
8.2	风险型决策	201
8.3	不确定型决策	213
8.4	效用理论在决策中的应用	216
8.5	对策分析	220
	复习思考题	227
9	系统管理	230
9.1	战略研究与管理	230
9.2	战略管理的发展趋势	232
9.3	路 线 图	234
9.4	网络化管理	242
9.5	矩阵式管理	244
	复习思考题	249
	参考文献	250

1 绪 论

系统工程是一门正处于发展阶段的学科。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,是用系统科学的观点,合理地结合控制论、信息论、经济管理科学、现代数学、计算机技术和其他有关的工程技术,按照系统开发的程序和方法去研究和建造最优化系统的一门综合性的管理工程技术。系统工程以系统为对象,从系统的整体观念出发,研究各个组成部分,分析各种因素之间的关系,运用数学和系统分析方法,寻找系统的最优方案,使系统的总体效果达到最佳。

1.1 系统概述

1.1.1 系统的概念

“系统”一词最早出现于古希腊德莫克利特著的《宇宙大系统》一书中,原意是指事物中共性部分和每一事物应占据的位置,也就是部分组成整体的意思。

“系统”一词广泛存在与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。从中文字面看,“系”指关系、联系,“统”指有机统一,“系统”则指有机联系和统一。究竟什么是系统呢?往往不同的人或同一个人在不同的场合会对它赋予不同的含义。

一般系统论创始人贝塔朗非定义:“系统是相互联系相互作用的诸元素的综合体”。

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结合;由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合”。

在日本的 JIS 标准中,“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”。

前苏联大百科全书中定义“系统”为“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”。

《中国大百科全书(自动控制与系统工程卷)》解释系统是由相互制约、相互作用的一些部分组成的具有某种功能的有机整体。

从系统基本特征的角度,寻找一种较为通用的描述方式。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 (systems)中所有元素构成的集合; R (relationship)为系统中所有关系的集合。

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。

1.1.2 系统的特性

由系统的定义,不难总结出一般系统应具有下述特性。

1. 整体性

系统的整体性是系统最基本最核心的特性,主要表现为系统的整体功能。系统的整体功能不是各组成要素功能的简单叠加,也不是组成要素的简单拼凑,而是呈现出各组成要素所没有的新功能,可概括地表达为“系统整体不等于其组成部分之和”,而是“整体大于部分之和”,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、整体的功能上。

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。就是说,任何一个要素不能离开整体去研究,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和目的,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。

2. 相关性

组成系统的要素是相互联系、相互作用的,相关性说明这些联系之间的特定关系和演变规律。例如,道路交通控制系统是一个大系统,它由道路网、车辆、信号控制系统以及交通规则等单元或子系统组成,通过系统内各子系统相互协调的运转使道路上行驶车辆有条不紊。要求系统内的各个子系统为整体目标服务,提高系统的有序性,尽量避免系统的“内耗”,提高系统整体运行的效果。

3. 层次性

从系统作为一个相互作用的诸要素总体来看,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,生命系统: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,在系统层次结构中表述了在不同层次子系统之间的从属关系或相互作用的关系。在不同的层次结构中存在着小同的运动形式,构成了系统的整体运动特性,为深入研究复杂系统的结构、功能和有效地进控制与调节提供了条件。

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。比如,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。因此,系统必须与时俱进,适应外部环境的变化。只有系统内部关系和外部关系相互协调、统一,才能全面地发挥出系统的整体功能,保证系统整体向最优化方向发展。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。

上述系统的五个基本特性,是处理系统问题时,应具备的主要观点,即从总体目标出发着眼长远、整体优化的观点;从系统的内在联系分析问题的观点;考虑系统结构层次性的观点;考虑外界条件变化,使系统适应环境的观点等。在系统分析、设计、评价、决策时,这些基本观点是第一位的。离开这些基本观点,将会导致错误的结果。

当然,我们还可以列出系统的其他一些特性,诸如集合性、动态性、可控性、反馈性、再现性等等。

1.1.3 系统的分类

系统的种类繁多多样,我们可以从不同的角度对其进行分类。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,它可视作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。

此外,还可以根据某些特征,将系统分为因果系统、目的系统、控制系统、行动系统、对象系统、简单系统、复杂系统等。

1.2 系统工程

1.2.1 系统工程的概念

系统工程(systems engineering)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,可为我们认识系统工程这门学科的性质提供参考。

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”。

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。”

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。”

《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。”

美国科学技术词典的定义:系统工程是研究彼此密切联系的众多要素所构成的复杂系统的设计的科学。在设计这种复杂系统时,应有明确预定功能及目标,而在组成它的各要素之间及各要素与整体之间又必须能够有机地联系、配合协调,以使系统总体达到最优目标。在设计时还要考虑到参与系统中人的因素和作用。

日本工业标准(JIS)规定:“系统工程是为了更好地达到系统目标,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。”

汪应洛教授认为,所谓系统工程,是用来开发、运行和革新一个大规模复杂系统所需理论、方法论方法的总和(总称)。

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。

综上所述,系统工程的研究对象是大型复杂的人工系统和复合系统;系统工程的研究内容是组织协调系统内部各要素的活动,使各要素为实现整体目标发挥适当作用;系统工程的研究目的是实现系统整体目标最优化。因此,系统工程是一门现代化的组织管理技术,是特殊的工程技术,是跨越许多学科的边缘科学。

1.2.2 系统工程的特点

1. 整体性(系统性)

整体性是系统工程最基本的特点,系统工程把所研究的对象看成一个整体系统,这个整体系统又是由若干部分(要素与子系统)有机结合而成的。因此,系统工程在研制系统时总是从整体性出发,从整体与部分之间相互依赖、相互制约的关系中去揭示系统的特征和规律,从整体最优化出发去实现系统各组成部分的有效运转。

2. 关联性(协调性)

用系统工程方法去分析和处理问题时,不仅要考虑部分与部分之间、部分与整体之间的相互关系,而且还要认真地协调它们的关系。因为系统各部分之间、各部分与整体之间的相互关系和作用直接影响到整体系统的性能,协调它们的关系便可提高整体系统的性能。

3. 综合性(交叉性)

系统工程以大型复杂的人工系统和复合系统为研究对象,这些系统涉及的因素很多,涉及的学科领域也较为广泛。因此,系统工程必须综合研究各种因素,综合运用各门学科

和技术领域的成就,从整体目标出发使各门学科、各种技术有机地配合,以达到整体最优化的目的。例如,把人类送上月球的“阿波罗”登月计划,就是综合运用各学科、各领域成就的产物,这样一项复杂而庞大的工程没有采用一种新技术,而完全是综合运用现有科学技术的结果。

4. 满意性(最优化)

系统工程是实现系统最优化的组织管理技术,因此,系统整体性能的最优化是系统工程所追求并要达到的目的。由于整体性是系统工程最基本的特点,所以系统工程并不追求构成系统的个别部分最优,而是通过协调系统各部分的关系,使系统整体目标达到最优。

系统工程一般采用先决定整体框架,后进入内部详细设计的程序;试图通过将构成事物的要素加以适当配置来提高整体功能,其核心思想是“综合即创造”。

在运用系统工程方法来分析与解决现实复杂系统问题时,需要确立系统的观点(系统工程工作的前提)、总体最优及平衡协调的观点(系统工程的目的)、综合运用方法与技术的观点(系统工程解决问题的手段)、问题导向和反馈控制的观点(系统工程有效性的保障)。这些集中体现了系统工程方法的思想及应用要求。

1.2.3 系统工程的形成与发展

第一次提出“系统工程”一词的是 1940 年在美国贝尔电话公司试验室工作的莫利纳(E. C. Molina)和在丹麦哥本哈根电话公司工作的厄朗(A. K. Erlang),他们在研制电话自动交换机时,意识到不能只注意电话机和交换台设备技术的研究,还要从通信网络的总体上进行研究。他们把研制工作分为规划、研究、开发、应用和通用工程等五个阶段,以后又提出了排队论原理,并应用到电话通信网络系统中,从而推动了电话事业的飞速发展。

在第二次世界大战期间,一些科学工作者以大规模军事行动为对象,提出了解决战争问题的一些决策和对策的方法和工程手段,出现了运筹学。当时英国为防御德国的突然空袭,应用系统工程的方法,研究了雷达报警系统和飞机降落排队系统,取得了很多战果。

1945 年,美国建立了兰德公司(RAND Corp.)。该公司应用运筹学等理论方法研制出了多种应用系统,在美国国家发展战略、国防系统开发、宇宙空间技术以及经济建设领域的重大决策中,发挥了重要作用。

1957 年,美国密执安大学的哥德(Goode)和麦科尔(Machal)两位教授合作出版了第一部以“系统工程”命名的书。

20 世纪 50 年代后期和 60 年代中期,美国为改变空间技术落后于苏联的局面,先后制定和执行了北极星导弹核潜艇计划和阿波罗登月计划,这些都是系统工程在国防科研中取得成果的著名范例。

1965 年,麦科尔又编写了《系统工程手册》一书,比较完整地阐述了系统工程理论、系统方法、系统技术、系统数学、系统环境等内容。至此,系统工程初步形成了一个较为完整的理论体系。

20 世纪 70 年代以来,随着微型计算机的发展,出现了分级分布控制系统和分散信号处理系统,扩展了系统工程理论方法的应用范围。近年来,社会、经济与环境综合性的大系统问题日益增多,且许多技术性问题中还带有政治、经济的因素。例如,北欧跨国电网的供电问题。该电网有水、火、核等多种能源形式,规模庞大,电网调度本身在技术上已相当复杂,而且还要

受到各国经济利益冲突、地理条件限制、环境保护政策制约和人口迁移状况的影响,因此,负荷调度的目标和最佳运行方式的评价标准十分复杂,涉及多个国家社会经济因素。该电网的系统分析者要综合这些因素,对 4 500 万 kW 的电力做出合理的并能被接受的调度方案,提交各国讨论、协调和决策,这就是一个典型的系统工程问题。

在我国,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、许国志教授的引导下,建立了第一个运筹学小组;20 世纪 60 年代,著名的数学家华罗庚大力推广了统筹法、优选法。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,与国际系统工程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丰硕的应用成果。

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,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	美国海军研制北极星导弹计划	美国海军特种计划局提出 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	创立了矩阵式管理技术、图解协调技术、风险评审技术、技术预测关联树法
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、登月工程	系统工程在中国的研究与应用日益广泛

1.2.4 系统工程的应用

系统工程作为研究复杂系统的一种行之有效的技术手段,已经得到了广泛的应用,主要有如表 1.2 所示的若干领域。

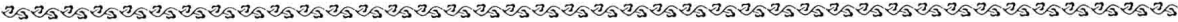


表 1.2 系统工程的应用领域与主要研究内容

应用领域	主要研究内容
社会系统工程	它的研究对象是整个社会,是一个开放的复杂巨系统。它具有多层次、多区域、多阶段的特点,如社会经济系统的可持续协调发展总体战略研究
经济系统工程	运用系统工程的方法研究宏观经济系统的问题,如国家的经济发展战略、综合发展规划、经济指标体系、投入产出分析、积累与消费分析、产业结构分析、消费结构分析、价格系统分析、资源合理配置、经济政策分析、综合国力分析、世界经济分析等
区域规划系统工程	运用系统工程的原理和方法研究区域发展战略、区域综合发展规划、区域城镇布局、区域资源合理配置、城市资源规划、城市公共交通规划与管理等
环境生态系统工程	研究大气生态系统、大地生态系统、流域生态系统、森林与生物生态系统、城市生态系统等系统分析、规划、建设、防治等方面的问题,以及环境检测系统、环境计量预测模型等问题
能源系统工程	研究能源合理结构、能源需求预测、能源开发规模预测、能源生产优化模型、能源合理利用模型、电力系统规划、节能规划、能源数据库等问题
水资源系统工程	研究河流综合利用规划、流域发展战略规划、农田灌溉系统规划与设计、城市供水系统优化模型、水能利用规划、防污指挥调度、水污染控制等问题
交通运输系统工程	研究铁路、公路、航运、航空综合运输规划及其发展战略、铁路调度系统、公路运输调度系统、航运调度系统、空运调度系统、综合运输优化模型、综合运输效益分析等
农业系统工程	研究农业发展战略、大农业及立体农业的战略规划、农业投资规划、农业综合规划、农业区域规划、农业政策分析、农产品需求预测、农产品发展速度预测、农业投入产出分析、农作物合理布局、农作物栽培技术规划、农业系统多层次开发模型等
工程项目管理系统工程	研究工程项目的总体设计、可行性、工程进度管理、工程质量、风险管理、风险投资分析、可靠性分析、工程成本效益分析等
科技管理系统工程	研究科学技术发展战略、科学技术预测、优先发展领域分析、科学技术评价、科技人才规划等
人口系统工程	研究人口总目标、人口系统数学模型、人口系统动态特性分析、人口结构分析、人口区域规划、人口系统稳定性等
教育系统工程	研究人才需求预测、人才与教育规划、人才结构分析、教育政策分析、学校系统化管理等

1.3 体系与体系工程

体系的基本含义是由系统组成的系统,英文有 System of Systems(SoS)、Super-System、Meta-System 等。从 20 世纪 80 年代以来,随着现代信息技术的迅速发展,各式各样由多个系统组成的更大的系统,在实际应用中快速发展起来,这就产生了体系的概念。如卫星对地观测体系、因特网体系、智能交通体系以及企业信息网体系等等。体系考虑问题的视野是系统之上的系统,包含本系统而比本系统更大的系统。系统概念的产生不仅适应了信息化社会发展的进程,同时也引起了相关领域人类活动方式的深刻变化。由于体系重要性的日渐突出,体系特性及其相关规律的研究引起人们重视,出现了把体系作为专门领域进行多学科交叉研究的趋向。

1.3.1 体系的概念

从系统的层次性看,系统可分解为一系列具有一定层次结构的子系统,同时,系统也可能被包含在更大的系统中,这个更大的复杂系统就是通常所说的体系。体系尽管作为由系统组成的更高层次系统所带来的新现象得到普遍承认和重视,但至今仍没有一个普遍接受的明确定义。

Eisner(1991)等人认为体系是:①系统耦合既非完全依赖也非完全独立,而是相互依存的;②单个系统从体系角度看是单一功能的;③每一系统的最优化并不保证整个体系的最优;④系统的联合运作提供对整个使命的满足。

Shenhar(1994)给出了一个简明的定义:体系是大范围分布系统的集合或系统的网络,这些系统一起工作达到共同目的。

Maier(1998)给出的定义是:体系是组分的集合物,这些组分单个可作为系统并具有以下特性:①组分独立工作;②组分的管理独立性。组分系统实际上是独立运行的。另外,他还指出,体系具有渐进开发与整体涌现的行为特性。

Sage(2001)等人认为,体系必须满足五个主要特征:组分系统独立运行;组分系统独立管理;组分系统分布在不同地点,它们之间仅有信息交互;可以涌现任何组分系统不具备的新行为或新功能;不断发展进化。体系永远不会停止进化,随着时间的推移,体系在不断地增加、减少、进化或产生新的功能和用途。

2002年10月,Old Dominion大学的Keating等人在倡议成立国家体系工程中心(NCSO-SE)论文中,认为应把体系定义为由多个自治的嵌入式复杂系统组成的元系统(Meta Systems),这些组分系统在技术、背景、运作、地理及概念框架等方面表现出多样性。

张最良等人(2005)认为,体系是能得到进一步“涌现”性质的关联或联结的独立系统集合。这个定义说明体系的三个基本要素:①系统独立可用;②相互关联或联结;③能得到进一步的涌现性质。

也有人认为,体系是由若干可以作为系统看待的组分构成的集合,并且每个组分具有两个额外的特性:即使用上的独立性和管理上的独立性。

体系定义的多样性,一方面说明体系问题的普遍性,各领域和专业都基于各自的背景提出自己的定义;另一方面也说明关于体系问题的研究尚处于初期,以至于还不能有一个共同接受的看法。事实上,系统和体系的概念有时是可以互换的两个概念,但它们既有相同之处,也有不同之处。一般来说,系统的概念比较泛一些,即可以指由众多系统组成的大系统,系统内部的各系统既可以是合作关系,也可以是对抗关系。体系虽然是由系统组成的,但体系中的各系统一般都为合作关系。因此,体系也是一种系统,但它是一种特殊的系统。

因此,可把体系定义为:基于统一的标准将一组地理上分布广泛且具有独立功能的系统集成成为能完成单个系统所无法完成的特定目标的新系统。

如交通运输有铁路、公路、水路、空中运输等多个相互独立运行的系统,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各种不同层次的需要。因此,根据体系的定义,交通运输是由铁路、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,等等。

1.3.2 对体系概念的理解

(1)体系是一类特殊的系统。说体系是系统,就应该具备系统的一般性特征,包括结果、组成、环境、运行等,体系也可以是复合的,即体系中可以包含体系或系统,而且也可以是分层的。说体系是特殊的系统,其特殊性主要体现在:一是体系属于高层的概念,例如,国家体系,一般不会去指那些低层的事物;二是体系内部组分系统可能有竞争关系但不会产生对抗关系,而更多的是合作关系;三是体系属于整体的概念,体系的任何局部都不能代表体系的本身,体系必须通过整体才能体现。体系的任何一部分的缺失,都会导致体系能力或性能的严重退化,这时也就不成为体系了,至少不是现在这个体系了。

(2)体系内各系统松散耦合,独立运行,相互依存。体系的内部组分系统联系是松散的,不像系统内部连接非常紧密,总是要通过最小(信息流)方式连接,以保证其运行的独立性。但体系内各组分系统又相互依存,以确保共同去完成体系的使命。

(3)体系渐进成型,效果整体涌现。体系形态是一个不断变化的过程,由于其组分系统不断变化,体系本身也在不断地改变,逐步成型。即使成型后,也会随着系统的老化又不断衰退,除非又重新改进。这样体系就一定有一个从形成到衰退的生命周期。但如果不断改变更新,体系就会长期存在,但其内部系统的生命周期仍然会存在。体系成型结果最好的时候就是体系能力发挥最好的时候,这时体系将因为系统之间的相互作用而形成最好的涌现效果,也是体系效能最高的时候。

涌现性是体系最重要的特征之一,是决定是否形成了体系的重要标准。没有涌现性,体系只能说是一组系统的集合。涌现性是指整体具有而部分不具有的东西。从层次结构的角度看,涌现性是指那些高层次具有而还原到低层次就不再存在的属性、行为、特征、功能。通俗地说,就是“ $1+1>2$ ”,“整体大于部分之和”,“多来自少”,“复杂来自简单”等。

1.3.3 体系的结构及优化

体系的结构指的是体系的组成要素及内部结构关系,还包含了组成要素与环境之间的相互关系。这个结构反映了体系的组成和运行,结构决定功能。

体系结构的优化,是针对体系的需求和全寿命管理的需要,在一定经济和技术可行性等约束条件下,通过综合运用系统分析、建模仿真、系统优化等方法,对数量规模、质量性能、经费投入等方面的权衡分析和综合论证,对提出的备选方案进行对比分析、综合评价、寻求最佳体系建设方案和整体最优效能的全过程。

体系结构具有层次性和动态性等主要特征,反映了体系是由多层次组成、在发展过程中会不断演化等特点。因此,一方面,对于体系的优化必须从多个层次运行;另一方面,体系结构的优化还要根据演化过程中不同的情况进行。

1.3.4 体系工程的概念与特点

现在要研究和解决的问题,如低碳经济、绿色交通、环境保护、社会保障、网络信息体系建设都涉及多个复杂系统,集成这些复杂系统就形成了开放的复杂巨系统,这就是我们前面所说的体系。

体系工程(SOS Engineering),概括地说,就是采用系统思想和体系的观点,以整体优化为