



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

System Engineering

系统工程

● 吴祈宗 主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

系统工程

System Engineering

吴祈宗 主编



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书比较全面和系统地介绍了系统与系统工程、系统分析、系统分析技术、系统预测、系统建模、系统设计与系统评价、系统优化、系统决策等内容,共分为8章。全书着重阐述系统工程的基本思想、理论、模型和方法,力求做到深入浅出,通俗易懂,适于教学和自学。每章配置了主要内容、核心概念、学习目标、小结和习题,便于读者理解、消化书中的内容。全书融入了作者长期的教学经验和科研成果,在编排上注意体现教学思路的完整性,同时也考虑了自学者学习方便。

本书可作为高等学校工程类、管理类等有关专业学生的专业基础课教材,或作为其他专业的公共基础课、选修课教材,也可作为广大从事系统工程工作的系统管理人员的自学参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

系统工程/吴祈宗主编. —北京:北京理工大学出版社,2008.7 重印
ISBN 978-7-5640-0646-4

I. 系… II. 吴… III. 系统工程-高等院校-教材 IV. N945

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 140355 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 20.5

字 数 / 486 千字

版 次 / 2008 年 7 月第 1 版第 2 次印刷

印 数 / 4001 ~ 6000 册

定 价 / 35.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 吴皓云

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前言

第二次世界大战以后，为适应社会化大生产和复杂科学技术体系的需要，人们逐步把自然科学与社会科学中的某些理论和策略、方法联系起来，应用现代数学和电子计算机等工具，解决复杂系统的组织、管理和控制问题，以达到最优设计、最优控制和最优管理的目标，由此形成了系统工程学科。

系统工程作为一门科学技术虽然形成于 20 世纪中叶，但系统工程的思想方法和实际应用却可追溯到远古时代。我们的祖先在了解、改造自然的实践和社会活动中，早有许多朴素的系统概念和应用实例，早在公元前 500 年的春秋时期，著名的军事家孙武写出“孙子兵法”十三篇，指出了战争中的战略和策略问题，如进攻与防御、速决和持久、分散和集中之间相互依存和相互制约的关系，并依此筹划战争的对策，以取得战争的胜利。其著名论点，“知己知彼，百战不殆”、“以我之长，攻敌之短”等，不仅在古代，而且在当代的战争中都有指导意义。在当今激烈的国际市场竞争和社会经济各个领域的发展中，这些论断也有现实意义。战国时期，著名军事家孙臆继承和发展了孙武的学说，著有《孙臆兵法》，在齐王与田忌的赛马中，孙臆提出的以田忌出下马、上马、中马顺序对齐王上马、中马、下马顺序的对策，使处于劣势的田忌战胜了齐王，这就是从总体出发制定对抗策略的一个著名的对策论案例。

战国时期在生产方面，秦国太守李冰父子主持修建了四川都江堰工程，巧妙地将分洪、引水和排沙结合起来，使各部分组成一个整体，实现了防洪、灌溉、行舟、漂木等多种功能，直至今日，都江堰工程仍在发挥着巨大的经济效益，是我国古代水利建设中系统工程的一大杰出成就。北宋真宗年间，皇城失火、宫殿烧毁，大臣丁谓主持皇宫修复工程，采用了一套综合施工方案：先在需要重建的通衢大道上就近取土烧砖，在取土后的通衢深沟中引入汴水，形成人工河，再由此水路运入建筑材料，从而加快了工程进度；皇宫修复后，又将碎砖废土填入沟中，重修通衢大道，使烧砖、运输建筑材料和处理废墟三项繁重的工程任务协调起来，从而在总体上得到了最佳解决方案，一举三得，节省了大量劳力、费用和时间。在医学、农业等方面，我国古代也有许多著名学者用朴素的系统思想和方法取得了伟大成就。

在国际范围内，系统工程的萌芽时期可追溯到本世纪初的“泰勒系统”，为了提高工效，泰勒研究了合理工序和工人活动的关系，探索了管理的规律，1911 年他的《科学管理的原理》一书问世后，工业界出现了“泰勒系统”；在第二次世界大战时期，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，研究了雷达报警系统和飞机降落排队系统，取得了丰硕的战果。在这一时期，英、美等国在反潜、反空袭、商船护航、布置水雷等项军事行动中应用了系统工程方法，取得了良好的效果。

1940—1945 年,美国制造原子弹的“曼哈顿”计划由于应用了系统工程方法进行协调,在较短的时间内就取得了成功。1945 年,美国建立了兰德公司,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,“兰德”又被誉为“思想库”和“智囊团”。

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。“阿波罗登月”计划是一项巨大的工程,从 1961 年开始,持续了 11 年。该工程有 300 多万个部件,耗资 244 亿美元,参加者包括 2 万多个企业和 120 所大学与研究机构。整个工程在计划进度、质量检验、可靠性评价和管理过程等方面都采用了系统工程方法,并创造了“PERT”和“随机网络技术”[又称“图解评审技术(GERT)”,实现了时间进度、质量技术与经费管理三者的统一。在实施该工程的过程中及时向各层决策机构提供信息和方案,供各层决策者使用,保证了各个领域的相互平衡,如期完成了总体目标。计算机的迅速发展,为该复杂大系统的分析提供了有力的工具。

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,如环境污染、人口增长、交通事故、军备竞赛等。许多技术性问题也带有政治、经济的因素,如北欧跨国电网的供电问题,这个电网有水、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 万千瓦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,这是个典型的系统工程问题。我国现代的系统工程研究可追溯到 20 世纪 50 年代。

这些都为我们今天研究和发展系统工程的理论体系提供了宝贵的经验和重要的启示。用定量和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,都可以统一地看成是一类工程实践,统称为系统工程。

现代科学技术的发展,特别是计算机的出现和广泛使用,使系统工程在世界范围内迅速发展起来,许多国家有不少成功的重大研究成果。

系统工程是一门高度综合性的管理工程技术,它涉及自然科学和社会科学的多门学科,如应用数学(最优化方法、概率论、网络理论等)、基础理论(信息论、控制论、可靠性理论等)、系统技术(系统模拟、通信系统等)以及经济学、管理学、社会学、心理学等。

系统工程的主要任务是根据总体协调的需要,把自然科学和社会科学中的基础思想、理论、策略、方法等横向联系起来,应用现代数学和电子计算机等工具,对系统的构成要素、组织结构、信息交换和自动控制等功能进行分析研究,借以达到最优化设计、最优控制和最优管理的目标。系统工程的应用日趋广泛,至 20 世纪 70 年代,已发展成许多分支,如经营管理系统工程、后勤系统工程、行政系统工程、科研系统工程、环境系

统工程、军事系统工程等。

构成系统工程的基本要素是人、物、财、目标、机器设备、信息六大因素。各个因素之间是互相联系、互相制约的关系。系统工程大体上可分为系统开发、系统制造和系统运用三个阶段，每个阶段又可划分为若干小阶段或步骤。系统工程的基本方法是：系统分析、系统设计相系统的综合评价。具体地说，就是用数学模型和逻辑模型来描述系统，通过模拟反映系统的运行，求得系统的最优组合方案和最优的运行方案。它的基本特点是：把研究对象作为整体看待，要求对任一对象的研究都必须从它的组成、结构、功能、相互联系方式、历史发展和外部环境等方面进行综合考察，做到分析与综合的统一。

系统工程还是系统科学的一个分支，实际是系统科学的实际应用。可以用于一切有大系统的方面，包括人类社会、生态环境、自然现象、组织管理等，如环境污染、人口增长、交通事故、军备竞赛、化工过程、信息网络等。

我国系统科学的前辈钱学森院士曾明确指出：“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。……系统工程则是组织管理这种系统的规划、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科学方法。”

本书的编者都是从事系统工程教学与科研的教师，来自北京理工大学和焦作工学院，在长期教学、科研中积累了丰富的经验。本书的编写还参考了国内外的大量有关资料文献，吸取了有关兄弟院校的宝贵经验，可以说，本教材的编写是集体智慧的结晶。本书建立在读者具备高等数学和线性代数知识的基础之上，着重阐述系统工程的基本思想、理论、模型和方法，力求做到深入浅出，通俗易懂，适于教学和自学。全书融入了作者长期的教学经验和科研成果，在编排上注意体现教学思路的完整性，同时也考虑到自学者学习方便。

作为有一定针对性的教材，我们在内容的选择、例题的安排等方面都注意了专业知识的相关性，每章配置了主要内容、核心概念、小结和习题，便于读者理解、消化书中的内容。

本书由吴祈宗教授（北京理工大学）担任主编，多人执笔协作完成，其中第1、2章由左秀峰教授（北京理工大学）执笔，第3、4章由杨玉中老师（焦作工学院）执笔、第5、6章由齐延信副教授（北京理工大学）执笔，第7、8章由侯福均老师（北京理工大学）执笔。

在本书的编写过程中，北京理工大学出版社的樊红亮、刘铁编辑给与了大力的支持和帮助。我们在编写过程中还参考了大量的国内、外有关文献书籍，它们对本书的成文起了重要作用。在此对一切给予我们支持和帮助的朋友、同事、有关人员以及参考文献书籍的作者一并表示衷心感谢。

限于编者水平，书中难免有不当或失误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

第一章 系统与系统工程

- 第一节 系统的概念 / 2
- 第二节 系统工程与系统科学 / 8
- 第三节 系统工程方法论 / 14
- 第四节 系统工程的应用 / 19
- 习题 / 26

第二章 系统分析

- 第一节 系统分析的概念 / 28
- 第二节 系统分析的步骤和内容 / 31
- 第三节 系统目标分析 / 35
- 第四节 系统环境分析 / 42
- 第五节 系统结构分析 / 47
- 第六节 系统建模与系统评价 / 52
- 习题 / 56

第三章 系统分析技术

- 第一节 系统分析技术概述 / 58
- 第二节 层次分析法 / 63
- 第三节 主成分分析 / 73
- 第四节 因子分析法 / 82
- 第五节 模糊聚类分析 / 88
- 第六节 灰色关联分析 / 95
- 习题 / 105

第四章 系统预测

- 第一节 预测概述 / 108
- 第二节 定性预测技术 / 112
- 第三节 回归模型预测 / 116
- 第四节 平滑预测法 / 135
- 第五节 趋势预测 / 141
- 第六节 马尔柯夫模型预测 / 149
- 第七节 灰色预测 / 154
- 习题 / 164

第五章 系统建模

- 第一节 系统建模的基本概念 / 167
- 第二节 结构模型 / 173
- 第三节 系统模拟模型 / 182
- 第四节 投入-产出模型 / 192
- 第五节 系统动力学模型简介 / 203
- 习题 / 214

第六章 系统设计与系统评价

- 第一节 系统设计 / 216
- 第二节 系统评价 / 218
- 第三节 系统评价常用方法介绍 / 220
- 第四节 模糊综合评价 / 226
- 第五节 灰色综合评价 / 232
- 习题 / 239

第七章 系统优化

- 第一节 最优化问题的一般描述 / 241
- 第二节 线性规划 / 242
- 第三节 单目标最优化 / 249
- 第四节 目标规划 / 263
- 第五节 动态规划 / 266
- 第六节 智能优化算法 / 268
- 习题 / 284

第八章 系统决策

- 第一节 系统决策概述 / 285
- 第二节 随机型决策 / 288
- 第三节 多准则决策 / 293
- 第四节 模糊决策 / 304
- 习题 / 311

核心概念索引 / 313

参考文献 / 315

第一章

系统与系统工程

Chapter 1 System and System Engineering

“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科学方法。”

——钱学森

■ 本章主要内容

- 系统的概念
- 系统工程与系统科学
- 系统工程方法论
- 系统工程的应用

■ 本章核心概念

- 系统 (System)
- 系统思想 (System Thought)
- 系统工程 (System Engineering)
- 系统科学 (System Science)
- 方法论 (Methodology)
- 整体性 (Wholeness)
- 层次性 (Level)

■ 本章学习目标

- 掌握系统、系统思想、系统工程、系统科学、方法论等基本概念；
- 掌握系统的特性、分类；
- 了解系统工程的发展过程和系统科学的体系；
- 掌握系统工程的特点；
- 掌握系统工程的构思原则；
- 掌握系统工程的硬软方法论；
- 了解系统工程的应用。

系统工程是在处理各种复杂问题的实践中形成和发展的，它是一门新兴的交叉学科，还处于发展阶段。

系统工程是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。系统工程的核心是系统思想，

系统思想上升到哲学高度即为系统论。在系统论的指导下,为提高和改善解决问题的效率和有效性,而形成的工作原则、步骤、方法及方法步骤之间的关系就是系统工程方法论。

第一节 系统的概念

系统观念,自古有之,源远流长,但作为科学的系统思想则形成于20世纪中叶。

一、系统思想

系统思想最基本的涵义,是关于事物的整体性观念、相互联系观念和演化发展观念。系统概念来源于人类长期的社会实践经验。

在古希腊,对自然的认识主要来自于笼统的直观、理性的思辨和大胆的猜测,并通过天才的直觉去描绘整个自然界的轮廓,但不能具体地说明自然界内在的逻辑和规律。由于对构成自然界整体的许多细节和局部并不清楚,古希腊人只能从整体上去把握自然界的内在规律和特点,对自然界的总体认识是模糊的和肤浅的。这就使古希腊的自然哲学家们不得不用哲学的猜测来填补知识的空白。古希腊辩证法的奠基人之一赫拉克利特(Heracleitus)说:“世界是包括一切的整体。”古希腊的唯物主义哲学家德谟克利特(Democritus)就曾论述“宇宙大系统”,他在物质构造的原子论基础上,认为世界是由质子和虚空组成的,原子组成万物,形成不同系统层次的世界。古希腊的著名学者亚里士多德(Aristotle)关于事物的整体性、目的性、组织性的观念,以及关于构成事物的目的因、动力因、形式因、质料因的思想,可以说是古代朴素的系统观念。

在中国,传统的自然观是有机整体论思想,认为自然界是个活的有机体,天、地、人、物质和精神,人与自然环境之间没有严格的界限,它们是相互依赖、相互贯通、相互渗透的,自然界不是由各个组成部分机械地叠加的。古代朴素唯物主义哲学思想强调对自然界整体性、统一性的认识,把宇宙作为一个整体来研究,探讨其结构、变化和发展,以认识人类赖以生存的大地所处的位置和气候环境变化规律对人类生活和生产的影响。如在西周时期就出现了用阴阳二气的矛盾来解释自然现象,产生了“五行观念”,认为金、木、水、火、土是构成世界大系统的五种基本物质要素;古代名医扁鹊主张按病人气色、声音、形貌综合辨证,用砭法、针灸、汤液、按摩、熨贴多种疗法治病;周秦至西汉初年的古代医学总集《黄帝内经》强调人体各器官的有机联系、生理现象和心理现象的联系、身体健康与自然环境的联系;战国时期秦国李冰父子设计修造了伟大的都江堰水利工程,包括有“鱼嘴”岷江分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引水工程等三大主体工程 and 120 个附属渠堰工程,工程之间的联系处理得恰到好处,形成一个协调运转的工程总体;我国古天文学很早就揭示了天体运行与季节变化的联系,编制出历法和指导农事活动的廿四节气。所有这些古代农事、工程、医药、天文知识和成就,都在不同程度上反映了朴素的系统概念的自发应用。

古代朴素唯物主义哲学思想虽然强调对自然界整体性、统一性的认识,却缺乏对这一整体各个细节的认识能力,因而对整体性和统一性的认识是不完全、不深刻的。但是,力图从整体上把握自然规律的思想对现代科学的发展产生了深刻的影响。

15 世纪下半叶,近代自然科学开始兴起,发展了研究自然界的分析方法,包括实验、解剖和观察的方法,把自然界的细节从总的自然联系中抽取出来,分门别类地加以研究。19 世纪上半叶,自然科学有突破性进展,特别是能量转化、细胞学说和进化论的三大发现,使人

类对自然界的演化过程的相互联系的认识有了很大的提高,为辩证唯物主义的系统概念建立了坚实的基础、提供了丰富的材料。辩证唯物主义认为,物质世界是由许多相互联系、相互制约、相互依赖、相互作用的事物和过程所形成的统一整体。这就是系统概念的实质,物质世界普遍联系及其整体性的思想就是系统思想。

随着科学技术的发展和社会实践的需要,20世纪中期,出现了系统思想的量化方法和分析工具,使得系统思想从一种哲学思维发展成为专门的科学。系统思想在20世纪科学技术发展的客观要求下得到迅猛发展。

(1) 现代系统思想的发展最早出现于生物学领域。20世纪初期,生物学界存在着生物机械论和生物活力论之间的争论,在这种争论的基础上,产生了在系统科学发展历程中比较重要的一种思想,即贝塔朗菲的一般系统论思想,其突出的成就是提出了系统的整体观点、动态观点和等级观点。

(2) 现代系统思想的发展还体现在管理学领域中。19世纪末,工业生产规模日益扩大,专门从事组织管理的阶层随之出现。管理科学的发展经历了由古典管理理论、管理过程学派、社会系统学派再到以系统理论为指导的系统管理学派的过程,系统思想借助于在管理问题中的应用得到了长足发展。

(3) 20世纪中期,随着信息技术和控制技术的蓬勃发展,诞生了系统工程学科的基础理论——信息论与控制论。信息论主要研究系统的信息传输机制,控制论主要研究系统的反馈机制。它们所体现的系统思想为后来的复杂系统研究提供了必要的基础理论。

(4) 20世纪60年代末,以耗散结构理论的诞生为先导,相继产生了协同学、超循环理论、突变论、混沌学和分形学等一系列新理论、新学科。学术界对于客观世界的复杂性、组织性和整体性的认识又发展到了一个新的阶段。与一般系统论、控制论和信息论建立在平衡系统的概念和理论基础之上不同的是,耗散结构理论、协同学理论等将人们对系统的认识推进到以非平衡系统的自组织演化为研究对象。

人类认识现实世界的过程是一个不断深化的过程。客观世界中一切事物的发生和发展,都是矛盾的对立和统一。在古代,哲学家们往往把世界看成一个整体,寻求共性和统一,但由于科学技术理论贫乏,又缺乏观测和实验手段,所以对很多事物只能看到一些轮廓和表面现象,往往是只见森林而不见树木。随着科学技术的发展,理论丰富了,工具与手段先进了,认识也逐步深化。但受到当时科学技术水平的限制和世界观的局限,往往又只看到一些局部现象,致力于微观现象的研究,以致只见树木而不见森林。19世纪以来,认识不断深化,在对个体、对局部有了更新更深的了解以后,再把这些分散的认识联系起来,才看到了事物的整体,以及构成整体的各个部分之间的相互联系,从而形成了科学的系统观。现代科学的发展比过去更要求在多种学科门类之间进行相互渗透,这是在更深刻的分析的基础上向更高级综合发展的新阶段,因而出现了许多交叉学科和边缘学科。系统工程就是在这种背景下产生的一门交叉学科。

系统思想是进行分析和综合的辩证思维工具,它在辩证唯物主义中取得了哲学的表达形式,在运筹学、控制论以及各门工程学和社会科学中获得了定性和定量相结合的科学方法,并通过系统工程充实了丰富的实践内容。

二、系统的定义

现实世界中的一切事物都可以被看作系统,即系统是一切事物的存在方式之一,因而可

以用系统思想来考察、描述和分析事物。在自然界和人类社会中普遍存在着各种各样的系统,例如,银河系、太阳系、工业系统、农业系统、商业系统、计算机系统、原子核系统等。可以说系统无时不在,无处不有,大至无穷,小至微粒。

对系统的定义有许多不同描述,例如,在韦氏大辞典中,系统一词被解释为:有组织的和被组织化了的整体;结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合;由有规则、相互作用、相互依赖的诸要素形成的集合等。奥地利生物学家,一般系统论的创始人贝塔朗菲把系统定义为:相互作用的诸要素的综合体。日本 JIS 标准中对系统的定义是:许多组成要素保持有机的秩序,向同一目的行动的体系。我国著名科学家、系统工程的倡导者钱学森认为:系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机体,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。

上述对系统定义的各种描述尽管不同,但其涵义都是接近或一致的。概括起来,可以把系统定义为:系统是由相互关联、相互制约、相互作用的若干部分(元素)组成的具有特定功能的有机整体。

三、系统与元素间的关系

由系统的定义可以知道,系统是不同元素的有机组成体,元素是构成系统的最基本单位,不同或相同的元素按照不同的关联、制约和作用方式组成不同的系统。由此可见,构成系统必须具备三个条件:第一,系统必须由两个或两个以上的不同元素组成。系统是元素多样性和差异性的统一,系统离开了元素就不称其为系统;第二,元素与元素之间存在着一定的有机联系,从而在系统的内部和外部形成一定的结构或秩序。任一系统又是它所从属的一个更大系统的组成部分(元素)。这样,系统整体与元素、元素与元素、系统整体与更大的系统(环境)之间,存在着相互作用和相互联系,它们之间不同的联系构成不同的表现和功能,不相关的元素构不成系统。第三,系统是元素在一定相关作用下整合起来的。任何系统都是一个有机整体,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。

关于系统的描述是一种理想的客体,在形式上表现为元素的集合。系统与元素的对立统一是客观事物的本质属性和存在方式,它们相互依存、互为条件,在事物的运动和变化中,系统和元素总是相互伴随而产生、相互作用而变化,它们的相互作用有如下三方面:

1. 系统通过整体作用支配和控制元素

系统通过其整体作用来控制 and 决定各个元素在系统中的地位、排列顺序、性质和范围的大小,统率着各个元素的特性和功能,协调着各个元素之间的数量比例关系等。在系统整体中,每个元素以及元素之间的相互关系都由系统所决定。例如,一个企业管理组织系统的整体功能,决定和支配着作为元素的生产、销售、财务、人事、科技开发等各子系统的地位、作用和它们之间的关系。为使管理组织的整体效益最佳,就要求各子系统必须充分发挥各自的功能,就要对各子系统之间的关系进行控制与协调,并要求各子系统充分发挥各自的功能。

2. 元素通过相互作用决定系统的特性和功能

元素对系统的作用有两种可能趋势。一种是如果元素的组成成分和数量具有协调、适应的比例关系,就能够维持系统的动态平衡和稳定,并促使系统走向组织化、有序化;另一种是如果系统中元素之间出现不协调、不适应的比例关系,就会破坏系统的平衡和稳定,甚至使系统衰退、崩溃和消亡。

3. 系统和元素的概念是相对的

由元素组成的系统,既是较高一级系统的组成部分,即是更大系统中的一个元素,同时它又是较低一级组成元素的系统。例如,某总厂是以几个分厂作为元素组成的系统,而总厂又是更大系统——企业集团的一个组成元素。正是由于系统和元素地位与性质关系的相互转化,构成了系统的等级性或层次性。

四、系统的特性

1. 整体性

系统的整体性是指系统不是元素的简单之和,而是按照某种方式的整合产生出整体具有而元素或元素总和所没有的东西,如整体的特性、整体的功能。系统一旦分解成元素,整体所表现的东西便不复存在。

系统的整体性表明,任何一个元素都不能离开整体去研究,元素间的联系和作用也不能脱离整体的协调去考虑,脱离了整体性,元素的机能和元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。另外,系统的构成元素和元素的机能、元素的相互联系都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元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。在一个系统中,即使每个元素并不都很完善,但它们也可以协调、综合,组成具有良好整体功能的系统。反之,即使每个元素都是良好的,如果元素之间不协调,也不能组成具有良好功能的完善系统。

2. 集合性

系统的集合性是指由两个或两个以上的可以互相区别的对象(元素)所组成的系统,类似一个集合。集合里的各个对象叫做集合的元素(子集)。例如,一个计算机硬件系统,一般都是由运算器、存储器、输入/输出设备等硬件设备组成,同时还要有操作系统、应用程序、数据库等软件系统,才能构成一个可以使用的计算机系统的完整集合。

3. 相关性

组成系统集合的元素是相互联系、相互作用的,彼此之间毫无关系(不相关)的元素不能构成系统。元素的特性、数量及相关方式不同,构成的系统特性和功能就不同。相关性说明元素之间的特定关系,以及它们之间的演变规律。例如,城市生活本身就是一个大系统,它又可以划分为资源系统、市政系统、文化系统、教育系统、医疗卫生系统、商业系统、工业系统、交通运输系统、邮电通讯系统等具有密切关系、相互影响、相互制约、相互作用的各子系统,它通过各子系统相互协调的有机组成和运转去实现城市生活的有序化和可持续发展的城市整体目标。

4. 层次性

根据系统所含元素的数量及元素相互作用的结构关系,可以将系统分解为一系列的子系统并形成一定的层次结构。简单系统无需划分层次就可以将各基本元素有效地组织起来,而复杂系统必需按层次方式由高到低逐级进行分解或由低到高逐级进行整合,这是系统空间结构的特定形式。系统层次结构描述了不同层次子系统之间的从属关系或相互作用关系,揭示了系统与系统之间存在着包含、隶属、支配、权威、服从的关系。如任何生物都可以按照生物分类的门、纲、目、科、属、种的层次确定自己的位置。又如,社会是一个大系统,它包含政治、经济、军事、文教等子系统,而经济系统又包含农业、工业、商业、交通运输业等子系统,其中的工业系统又可以按照不同的分类方法分为不同的子系统。按层次性可以将一

个系统划分到最小的单元,在不同的层次结构中存在着动态的信息流和物质流,构成了系统的运动特性,为深入研究系统层次之间的控制与调节功能提供了条件。例如,把企业内部系统分层次建立生产、销售、财务、人事四个二级子系统,再运用系统工程的方法研究各个子系统,探讨它们如何为企业的利益目标服务。

5. 目的性

系统工程研究的对象系统都具有一定的目的性,要达到既定的目的,系统必须具有一定的功能。

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一般都具有多个目标,需要用一个指标体系来描述系统的目的。比如,衡量一个工业企业的经营实绩,不仅要考核它的产量、产值指标,而且要考核它的成本、利润和质量指标的完成情况。在指标体系中各个指标之间有时是相互统一的,有时又是相互矛盾的,为此,就要从整体目的出发,力求获得全局最优的效果,这就要求在指标之间做好协调工作,寻求平衡或折中方案。

为了实现系统的目的,系统必须具有控制、调节等管理功能,管理的过程也就是使系统有序化的过程,使它进入与系统目的相适应的状态。

6. 环境适应性

任何系统都是在一定的环境中产生,又在一定的环境中发展的。系统与外界环境产生物质、能量和信息交换,外界环境的变化必然会引起系统内部的变化。系统必须适应外部环境的变化,而不能适应环境变化的系统是没有持续生命力的,只有能够经常与外界环境保持最优适应状态的系统才是经常保持不断发展势头的理想系统。例如,任何一个工业企业都必须经常了解市场动态和同类企业的经营动向、有关行业的发展动态、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,调整企业内部的结构,以适应环境的变化。

五、系统的分类

在自然界和人类社会中存在着千差万别的系统,需要对系统存在的各种形态加以探讨和分类。

1. 自然系统与人造系统

按照系统构成的来源,系统可分为自然系统、人造系统和复合系统。自然系统是由自然过程产生的系统,这类系统的组成部分是由自然物(矿物、植物、动物等)所自然形成的系统,如宇宙系统、海洋系统、矿藏系统、生态系统、气象系统、水循环系统等。人造系统的元素及其关系都是人造物的系统,如人类造出各种机器所构成的各种工程系统、被用于进行科学实验的风洞系统、人造卫星系统等。复合系统是其元素既有自然物又有人造物的系统,如改造自然造福人类的三峡大坝水利电力系统、浅海人工养殖业等。

系统工程所要研究的系统,大多数是自然系统与人造系统的复合系统。随着科学技术的发展,人类改造自然、造福人类的能力越来越强,同时对人类赖以生存的自然环境造成了一定破坏,如造成了环境污染、破坏了生态系统良性循环。所以,环境保护、人类社会的可持续发展成为当代人的重要课题。系统工程愈来愈注意从自然环境的属性和关系中,探讨研究人造或复合系统。

2. 实体系统与概念系统

根据系统构成元素的属性,系统可以分为实体系统、概念系统和复合系统。实体系统是指以客观存在的矿物、生物、设施、工具和人等实体为构成元素所组成的系统,如机械系统、

生产系统、运输系统、通信系统等。概念系统是指以概念、原理、原则、方法、制度、程序等非物质实体为元素所组成的系统,如法律系统、管理系统、教育系统等。元素既有实体又有概念的系统称作复合系统。

概念系统是人类社会所特有的,由人脑产生并组织实施,对实体系统进行有效的指导、管理和服 务。实体系统是概念系统的物质基础和载体,概念系统是实体系统的抽象和描述。随着通信和计算机等科学技术的发展,概念系统不断强化,人类进入了信息社会 and 知识经济时代。概念系统与实体系统共同存在于实际系统中,分别表示了实际系统的不同侧面,它们相互作用,形成了各种各样的复杂系统。如现代物流系统中既包括系统管理的思想、原则和指令、信息等概念系统,也包括物资运输、装卸及储存的设备、库房等实体系统。再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、通信设备等实体系统。

3. 动态系统和静态系统

系统状态是指系统的那些可以观察和识别的状况、态势、特征等。在系统问题研究需要考虑的时间跨度内,根据系统状态是否随时间而变化,可将系统分为动态系统和静态系统。动态系统就是系统的状态是随时间而变化的,即系统的状态变量是时间函数。在足够大的时间尺度上看,任何系统都处于或快或慢的动态变化之中,都是动态系统。但当系统在所研究的时间范围内看不到变化,只需研究它们的共时性特征时,则可认为系统是静态系统,它是动态系统的一种极限状态,即处于稳定状态的系统。

例如,生态系统、经济系统、生产系统、人体系统等都是动态系统。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非常困难,有时为了便于研究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定。

4. 可控系统和不可控系统

从系统与人为关系上看,凡是根据一定的目的,能够改变其状态的系统就称为可控系统,否则称为不可控系统。大多数人工系统是可控的或在某种程度上是可控的,而大多数自然系统是不可控的系统。如计算机控制的现代机械加工生产过程自动控制系统是完全可控的系统,企业管理系统一般来说是不完全可控的系统,宇宙系统是不可控系统。

5. 开放系统与封闭系统

根据系统与其环境的关系来看,可以将系统分为开放系统和封闭系统。开放系统是指与外部环境有物质、能量和信息交换的系统,封闭系统是指与外部环境无关的系统。实际上,没有绝对的封闭系统,只是有时把与环境联系较少、相对独立的系统看作封闭系统。

例如,生态系统、教育系统、商业系统、工厂生产系统都是开放系统。这类系统根据环境的变化,不断调整系统的输入输出和系统内部的结构,以适应环境变化和保持相对稳定状况,并谋求发展。开放系统一般具有自适应和自调节的功能,是具有生命力的系统。一个国家、一个地区、一个企业都应该是一个开放系统,通过和外界环境不断地交换物质、能量和信息,而谋求不断地发展。

自给自足的小农经济、闭关锁国的封建国家不考虑自然环境时,可被近似看作封闭系统。这类系统的存在,是系统内部的各个子系统及其相互关系之中存在着某种均衡关系。在现代社会中,封闭系统是没有生命力的。

研究开放系统,不仅要研究系统本身的结构与状态,而且要研究系统所处的外部环境,

剖析环境因素对系统的影响方式及影响程度,以及环境随机变化的因素。由于环境是动态变化着的,具有较大的不确定性,甚至出现突变,所以当—个开放系统存在于某—特定环境中时,该系统必须具有某些特定的功能,才能具有继续生存和发展的条件。

6. 简单系统、简单巨系统和复杂巨系统

根据系统元素数量及元素之间关系的结构复杂程度,可将系统分为简单系统、简单巨系统和复杂巨系统。

简单系统是指组成系统的子系统(元素)数量比较少,而且子系统之间的关系也比较简单的系统,如—台设备。简单系统的局部与整体之间满足叠加原理,子系统与系统之间的关系明确。对于简单系统,系统状态可通过子系统状态叠加得到,子系统的状态可由系统状态的分解得出,如牛顿力学体系系统是简单系统。

简单巨系统是指组成系统的子系统数量非常多,但子系统种类不多,且它们之间的关联比较简单的系统。简单巨系统不再适用叠加原理,系统中不同层次的变化规律是不同的。研究处理这类系统的方法不同于简单系统的直接综合法,可采用统计的方法。耗散结构理论和协同学理论在这方面作出了贡献。

复杂巨系统是指组成系统的子系统数量很多,具有层次结构,它们之间的关系又极其复杂的系统,如生物体系统、人脑系统、社会系统等,其中社会系统是以有意识活动的人作为子系统的,是最复杂的系统,所以又称为特殊的复杂巨系统,这些系统又都是开放的,所以也称为开放的复杂巨系统。目前,研究、处理开放复杂巨系统的方法尚在探讨中,我国学者钱学森提出了“从定性到定量综合集成的方法”以及“研讨厅体系”的思想,为从整体上研究和解决这类问题提供了新的方法论。

思考题

1. 系统思想的核心是什么?表现形式有哪些?
2. 举例说明系统的内涵和外延。
3. 系统具有哪些特性?

第二节 系统工程与系统科学

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—些社会经济问题,它们都以系统的面貌出现,都要求从整体上加以优化解决。由于这种社会需要的巨大推动,以系统为研究对象,出现了—个“学科群”,簇拥着科学形态的系统思想涌现出地平线,横跨自然科学、社会科学和工程技术,从系统的结构和功能(包括协调、控制、演化)角度研究客观世界的系统科学应运而生。

—、系统工程的定义和特点

1. 系统工程的定义

系统工程是—门新兴的交叉学科,尚处于发展阶段,还没有统—的定义。以下列出了国内外知名学者对系统工程所作的解释。

(1) 中国著名科学家钱学森指出,“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制