



高等学校“十二五”规划教材 | 经济管理类

系统工程学

贾俊秀 刘爱军 李 华 编著 ©



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

014032875

N945-43
23

高等学校“十二五”规划教材 | 经济管理类

系统工程学

贾俊秀 刘爱军 李 华 编著



N945-43
23

西安电子科技大学出版社



北航

C1721096

27858010

内 容 简 介

本书主要介绍系统、系统工程、系统工程方法论、系统分析、系统结构模型化、系统仿真技术、系统动力学方法和系统评价方法等内容。书中突出系统和系统工程思想、系统工程方法论及方法在社会管理系统中的应用,目的在于培养学生掌握中外的系统思想方法论、系统分析和系统综合评价的方法及其在管理、经济系统分析中的应用。

本书可作为高等院校管理类、经济类专业的本科生教材,也可作为管理、经济相关专业的本科生、硕士生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

系统工程学/贾俊秀,刘爱军,李华编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.1

高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3259 - 9

I. ①系… II. ①贾… ②刘… ③李… III. ①系统工程学—高等学校—教材 IV. ①N945

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 007917 号

策划编辑 戚文艳

责任编辑 戚文艳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷有限责任公司

版 次 2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 20.5

字 数 485千字

印 数 1~3000册

定 价 35.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3259 - 9/N

XDUP 3551001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

系统思想和系统工程的概念是人类在长期的社会实践中产生和积累起来的,经过多年的发展,系统思想和系统工程的方法广泛应用于各个领域。为进一步深化教学改革和课程建设,加强管理、经济类学生综合性思维的训练和学习,提高学生用系统思想和方法解决问题的能力,我们编写了这本《系统工程学》。本书主要介绍系统工程的理论与方法在社会和管理系统中的应用。

本书每章均从一个案例导出每章要解决的问题,并在各章论述中,引用了来自学术期刊论文、毕业论文的大量案例或例题对相关内容进行充分的阐述。

本书共分为8章。前两章主要讲述系统和系统工程思想。第1章重点介绍了系统思想及其起源,系统的概念,系统的结构、功能和功效,系统的性质。第2章主要介绍了系统工程的概念及其产生和发展,还介绍了系统工程学的学科体系和理论基础。

第3章和第4章重点分析了系统工程的方法和方法论。第3章讲解了Hall三维结构、Checkland“调查学习”模式、综合集成法和物理-事理-人理四种主要的系统工程方法论。第4章主要对系统分析的概念、内容和工具进行了详细介绍。

第5章到第8章就一些主流的、在管理系统领域中常用的系统工程技术方法进行了详细介绍。第5章主要就系统结构的表达方式、建模的一般步骤和方法、递阶结构模型的规范方法、系统解释结构模型在实际中的应用以及该模型技术的发展趋势等内容进行了详细的分析。第6章阐述了系统仿真技术,介绍了系统仿真的产生、发展及研究现状;分析了离散事件系统仿真的五类建模结构、随机变量的产生方法、离散事件系统面向过程和面向对象的仿真方法,提炼总结了基于事件调度法、活动扫描法、进程交互法和三阶段法的离散事件系统仿真策略,以案例的形式重点讲解了Petri网建模。第7章阐述了系统动力学的产生、发展及其适用领域,分析了系统动力学测度系统动态结构与反馈机制的基本原理,结合生产生活中的案例对系统动力学建模步骤、DYNAMO计算机模拟建模语言、Vensim PLE系统动力学软件、模型建立、模型模拟、模型运行进行了详细研究。第8章对系统评价方法进行了介绍,阐述了系统评价遵循的基本原理、评价基本准则的构建、评价指标体系的数量化方法,结合案例重点分析了模糊综合评价方法和可能-满意度法两种系统评价方法。

本书第1~4章由贾俊秀老师编写;第5~8章由刘爱军老师编写;黄晨璐、韩蓄、戎彦珍和徐宁等同学参加了部分章节的编写工作;李华教授对全书进行了校稿和审阅。

教材编写是一项长期而艰苦的工作,感谢吴涛老师对全书的校改,感谢戚文艳编辑在教材编写中给予的帮助。在本书编写过程中参阅了大量资料、论文和著作,吸收了同行们辛勤劳动的成果,在此表示感谢。

由于编者理论水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者
2013年9月

目 录

第 1 章 系统	(1)
1.1 系统定义	(1)
1.1.1 系统概念的形成	(1)
1.1.2 系统的结构	(8)
1.1.3 系统的功能	(21)
1.1.4 系统的功效	(23)
1.1.5 系统的分类	(26)
1.2 系统的性质	(28)
1.2.1 系统的共性	(28)
1.2.2 系统的特性	(30)
1.3 案例	(33)
1.3.1 成功物流系统案例	(33)
1.3.2 校园一卡通系统应用案例	(34)
课后习题	(35)
参考文献	(36)
第 2 章 系统工程	(37)
2.1 系统工程概述	(37)
2.2 系统工程概念、产生及发展	(40)
2.2.1 系统工程的概念	(40)
2.2.2 系统工程的产生及发展	(41)
2.3 系统工程学及其理论基础	(46)
2.3.1 系统工程学的研究对象和内容	(46)
2.3.2 系统工程的理论基础	(48)
2.4 供应网络动态性的智能体模型	(63)
课后习题	(67)
参考文献	(68)
第 3 章 系统工程方法论	(69)
3.1 引言	(69)
3.2 Hall 三维结构模式	(71)
3.2.1 时间维	(72)
3.2.2 逻辑维	(73)
3.2.3 知识维	(79)

3.3 “调查学习”模式	(79)
3.3.1 “调查学习”模式的产生背景	(79)
3.3.2 “调查学习”模式的步骤及核心	(80)
3.3.3 三维结构与“调查学习”方法论比较	(82)
3.4 综合集成法方法论	(84)
3.4.1 综合集成方法论的产生	(84)
3.4.2 综合集成研讨厅体系的框架	(86)
3.4.3 综合集成方法的步骤	(88)
3.5 物理-事理-人理系统方法论	(90)
3.5.1 WSR 系统方法的内容及工作程序	(91)
3.5.2 应用 WSR 的案例分析	(94)
课后习题	(96)
参考文献	(97)
第4章 系统分析	(98)
4.1 系统分析概述	(98)
4.1.1 系统分析的定义	(98)
4.1.2 系统分析的要素	(101)
4.1.3 系统分析的步骤	(108)
4.1.4 系统分析的方法	(110)
4.2 系统分析主要内容	(114)
4.2.1 系统环境分析	(114)
4.2.2 系统目标分析	(125)
4.2.3 系统结构分析	(128)
4.3 系统分析工具	(133)
4.3.1 因果分析图	(133)
4.3.2 Pareto 分析	(135)
4.3.3 费用效果分析	(139)
4.3.4 故障树分析	(140)
4.3.5 熟练性分析	(146)
4.4 案例: A 集团物流系统分析	(149)
课后习题	(155)
参考文献	(155)
第5章 系统结构模型化	(157)
5.1 系统建模	(157)
5.1.1 系统模型	(157)
5.1.2 系统建模	(160)
5.1.3 系统建模的一般步骤和方法	(163)
5.1.4 模拟的概念及作用	(165)

5.2 系统结构建模分析	(165)
5.2.1 系统结构的基本表达方式	(166)
5.2.2 ISM 原理及步骤	(171)
5.2.3 建立递阶结构模型的规范方法	(172)
5.2.5 递阶结构模型的实用方法	(178)
5.3 系统结构模型化的应用	(179)
5.3.1 案例分析	(179)
5.3.2 ISM 法优缺点分析	(192)
5.4 系统工程模型技术的新进展	(192)
课后习题	(195)
参考文献	(195)
第 6 章 系统仿真技术	(197)
6.1 系统仿真概述	(198)
6.1.1 仿真的概念和作用	(199)
6.1.2 仿真技术的产生、发展和现状	(202)
6.1.3 系统仿真类型	(207)
6.1.4 定性仿真的产生与理论现状	(210)
6.2 离散事件系统仿真	(212)
6.2.1 离散事件系统与模型	(213)
6.2.2 随机数和随机变量的产生	(218)
6.2.3 离散事件系统的仿真模型和仿真策略	(222)
6.2.4 随机存储系统仿真	(230)
6.3 Petri 网建模方法	(234)
6.3.1 Petri 网简介	(234)
6.3.2 普通 Petri 网	(235)
6.3.3 Petri 网的变迁规则	(235)
6.3.4 时间 Petri 网	(237)
课后习题	(239)
参考文献	(239)
第 7 章 系统动力学方法	(240)
7.1 系统动力学概述	(241)
7.1.1 系统动力学的产生和发展	(241)
7.1.2 系统动力学的研究对象及适用领域	(242)
7.2 系统动力学基本原理	(243)
7.2.1 动态问题与反馈观点	(243)
7.2.2 系统动力学的基本原理	(244)
7.3 系统动力学建模方法	(245)
7.3.1 因果关系图及流程图	(245)

7.3.2	SD 结构模型的建模步骤	(248)
7.3.3	DYNAMO 语言编程	(249)
7.3.4	系统仿真软件	(260)
7.3.5	模型建立后的静态分析	(263)
7.3.6	模型模拟及数据集分析	(266)
7.4	案例分析	(269)
	课后习题	(272)
	参考文献	(275)
第 8 章	系统评价方法	(276)
8.1	系统评价概述	(276)
8.1.1	系统评价的类型	(277)
8.1.2	系统评价的步骤	(278)
8.1.3	系统综合评价	(280)
8.2	系统评价的准则体系	(281)
8.2.1	建立评价指标体系的程序	(282)
8.2.2	评价指标数量化方法	(282)
8.2.3	评价指标综合的主要方法	(283)
8.3	系统综合评价法	(285)
8.3.1	关联矩阵法	(285)
8.3.2	层次分析法	(289)
8.3.3	模糊综合评价方法	(300)
8.3.4	可能-满意度法	(303)
8.3.5	数据包络分析	(310)
	课后习题	(315)
	参考文献	(319)

第1章 系 统

【案例导入】 中国载人航天系统

北京时间2003年10月15日“神舟”五号将航天员杨利伟送上太空,“神舟”五号飞船载人航天飞行实现了中华民族千年飞天的愿望,是中华民族智慧和精神的高度凝聚,是中国航天事业在新世纪的一座新的里程碑。截至2012年,在已发射的“神舟”系列飞船中,“神舟”一号到“神舟”四号和“神舟”八号均为无人飞船,“神舟”五号为载人飞船,“神舟”六号为双人飞船,“神舟”七号和“神舟”九号为三人飞船,我国正在逐步实现着中国载人航天的目标。那么这些载人航天系统的成功运行都需要哪些组成要素呢?我们知道,载人航天系统具有七大系统,分别是航天员系统、飞船应用系统、载人飞船系统、运载火箭系统、发射场系统、测控通信系统、着陆场系统。这些系统相互配合,共同完成某项航天计划。

神舟飞船是一个系统,是成功运用系统思想的典型。本章就系统思想的发展,系统的概念、结构、功能和性质等一系列问题进行展开。

1.1 系统定义

社会实践的需要是系统思想和系统概念产生和发展的动因。而系统思想及其初步实践可以追溯到古代,其发展经历了一个漫长的历史过程。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,有助于深刻理解和更好地应用系统思想,并为后面学习系统工程打下良好的基础。本节就系统概念的形成,系统的定义、性质、结构、功能、功效等方面进行全面的介绍。

1.1.1 系统概念的形成

“系统”是我们很熟悉但又很难给出确切定义的一个词。暖气片、暖气管道和锅炉等组成了一个供暖系统;大学里的各个学院、教务处、科研处等部门构成了一个小的教育系统;人体中有以大脑为主的神经系统、以心脏为主的血液循环系统、消化系统和泌尿系统等。从这几个例子大致可知,系统由若干个部分组成,这些组成部分共同完成一个总的任务。

1. 中国古代朴素的系统思想

系统思想是在人类漫长的社会实践中逐步形成的。在古代,由于生产力发展和人类对世界认识的限制,当时的系统思想被披上了神秘色彩,我们称之为“朴素的系统思想”。我国古代朴素的系统思想体现在哲学、天文、军事、工程、医药等各个方面。

《周易》是中国古代哲学巨著,《周易》的思想讲究阴阳相济、刚柔有应,提倡自强不息、厚德载物。《周易》中以象征阳爻的“—”和象征阴爻的“-”为基本符号,由八卦中任意两卦

交相叠合而成的六十四卦为基本图形,来说明宇宙的一切现象,并通过占筮来启示天道、人道、地道的变化规律。

中国古代在天文方面的文章有《管子·地员》、《诗经·七月》等。这些文章对农作物与种子、地形、土壤、水分、肥料、季节、气候诸因素的关系,都有辩证的论述。我国古代天文学家为了发展原始农牧业,很早就关注天象的变化,把宇宙作为一个超系统,探讨了它的结构、变化和发展,揭示了天体运行与季节变化的联系,编制历法和指导农事活动的二十四节气。

《孙子兵法》是我国古代最杰出的兵书,是系统思想在我国古代军事方面的重要运用。公元前5世纪春秋末期,著名军事家孙武在他的著作《孙子兵法》中阐述了不少朴素的系统思想和谋略。

《孙子兵法》共十三篇,不到六千字。其前半部的《计》、《作战》、《谋攻》三篇是一组,《形》、《势》是一组,《虚实》是一组,上述三组比较侧重军事学的基础理论和战略问题;它的后半部,《军争》、《九变》、《行军》、《地形》、《九地》五篇是一组,比较侧重运动战术和地形学的研究,《火攻》和《用间》则讨论了战争中比较特殊的两个问题。《孙子兵法》言简意赅,富于哲理,不仅透彻地论述了战争理论的核心问题,并且发人深思,启迪人们认识和思索人类社会生活领域许多方面的矛盾现象,具有丰富的朴素的唯物思想和辩证因素。如至理名言“知己知彼,百战不殆”,至今不失其真理性。对当代这样一个竞争型的社会来说,《孙子兵法》的魅力已经超出了军事领域,在工商业、体育业甚至日常生活中也得到了广泛的应用。

都江堰工程等是系统思想在中国古代工程方面应用的典型代表。都江堰是我国古代一项杰出的大型工程建设,至今仍发挥着重要作用。位于四川省都江堰市的都江堰工程是公元前250年前后修筑起来的。整个工程有“鱼嘴”岷江分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引水工程三大主体部分,加上一系列灌溉渠道网,巧妙地结合成一个完整的系统,成功地解决了成都平原的灌溉问题,具有总体目标最优化、选址最优和自动分级排沙、利用地形并自动调节水量、就地取材及经济方便等特点,是系统思想应用的典型。

北宋宋真宗时期的“丁渭工程”是系统思想在工程方面应用的另一典型代表。当时,因皇城失火,宫殿被毁,皇帝任命一个名叫丁渭的大臣负责皇宫的修复工程。对于这样一个比较紧急的任务,丁渭的施工方案是:首先把皇宫旧址前面的一条大街挖成沟渠,用挖沟的土烧砖,从而解决了部分建筑材料问题;再把开封附近的汴水引入沟内,形成航道,便于从外地运输沙石木料等;待皇宫修复后,把沟渠里的水排掉,用建筑垃圾、废弃杂物填入沟中,恢复原来的大街。这一实施方案实际上应用了系统工程的系统思想,其设计之巧妙令人赞叹。

《黄帝内经》是我国古代最著名的医学典籍。其中天人合一、阴阳平衡、顺应四时的理念,一直被人们奉为养生保健的无上准则。《黄帝内经》由《素问》和《灵枢》两部分组成,各有九卷八十一篇,主要论述了气、阴阳、五行三个基本元素的变化,是中国最早、最完整、内容最丰富的一部医学典籍,距今已有两千多年。不论是天人关系、气血运行,还是脏腑诊治、静脉识别、灸刺论述,《黄帝内经》在各个方面都表现出极高的智慧。

如同《周易》的玄妙莫测,《黄帝内经》的内容也相当深奥,后人很难完全理解其中的涵

义,因此部分内容具有非常神秘的色彩。其根据阴阳五行的朴素辩证法,把自然界和人体看成是由五种要素相生相克、相互制约而组成的有秩序、有组织整体。《黄帝内经》和其他古代医学中的病机、气血、经络等学说,以及在此基础上建立起来的辩证论,都充分体现了系统思想。

我国古代并没有提出一个明确的系统概念,也没有建立起一套完整的系统体系,但对客观世界的系统性及整体性却已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。例如,春秋末期的思想家老子曾阐明了自然界的统一性,指出“道生一、一生二、二生三、三生万物”;西周时期出现了“阴阳二气”及金、木、水、火、土“五行说”;东汉时期张衡提出了“浑天说”。

2. 国外古代朴素的系统思想

其他国家和民族在生产及社会活动中较早产生朴素系统观念的例子有很多,主要集中在古希腊、古罗马和古巴比伦等国家。

古希腊文明的最大贡献在于哲学和科学方面,不少重要人物在现代科学技术教科书中都无一例外地被提到。古希腊的伟大思想家和科学家亚里士多德提出的关于整体性、目的性、组织性的观点,以及“整体大于部分的总和”的思想是系统论的基本原则之一。赫拉柯利特是艾奥里亚学派学术思想的发展者。他提出了“人不能两次踏上同一条河流”的著名命题,意在说明一切事物都处于永恒的不断变化中。赫拉柯利特认为,世界本身就是事物的不断发展、变化和不断更新的过程,一切都在变化着,也存在着,所以运动和发展与物质本原是不能脱离的。

欧几里得的《几何本原》是用公理法建立起演绎体系的最早典范。人类在此之前所积累下来的数学知识,是零碎的、片段的。《几何本原》借助逻辑方法,把这些知识组织起来,加以分类、比较,揭露彼此间的内在联系,对整个数学的发展产生了深远的影响,是系统思想的自然体现。阿基米德吸收了几何学中的演绎方法,从一系列公理出发,推证出了他的杠杆原理。阿基米德的证明方法在科学史上占有重要的地位,它开辟了利用数学方法研究科学问题的道路,对数学和物理学的发展起到了推动作用。这种定量逻辑分析正是现在系统科学和系统工程理论与技术的基本特征之一。

泰勒斯是公认的希腊哲学鼻祖和数学家,他在数学方面的贡献是开始了命题的证明,标志着人们对客观事物的认识从感性上升到理性,这在数学史上是一个不寻常的飞跃。德谟克利特是古希腊唯物主义哲学家,他把宇宙看成一个统一的整体,并认为宇宙是由原子组成的,原子的运动和相互作用构成了整个宇宙的运动变化。他曾提出“宇宙大系统”的概念,认为世界由原子和真空所组成,原子组成万物,形成不同的系统和有层次的世界。

古罗马文明的主要贡献在于法律、技术和建筑等方面。古罗马帝国拥有一部令世人称颂的文明之珠——罗马法。罗马的法律从公元前450年的《十二铜表法》发端,到奥古斯都成为元首后发展为一套十分完备的体系。罗马法包括三个方面,第一方面是罗马公民法,应用于罗马公民;第二方面是万民法,应用于罗马帝国统治下的所有人民;第三方面是自然法,此法强调自然和社会的理性及正义的秩序,指出所有人都是平等的,都拥有基本权利,而政府不能侵犯这些权利。如果国王不遵守自然法,那他将自动变成暴君。罗马法的产生标志着文明进步的新阶段,这是系统思想在上层建筑应用的体现。

在科学技术方面,托勒密利用自己观测的大量资料 and 前人积累的成果,正确地说明了月亮绕着地球运动的规律,相当准确地确定了月地距离,使地心说的体系与实测的结果相符合,并建立了最完整的地心说宇宙体系。这一体系统治欧洲达一千余年,直到哥白尼的日心说模型确立为止。盖伦是自古希腊以来医学的集大成者,他认为人体由器官、液体和灵气组成,并通过人体解剖考察了心脏和脊髓的作用。

古巴比伦人很早就开始运用整体的思想来观察宇宙。他们把宇宙看做一个整体,认为宇宙是一个密封的箱子,大地是它的底板,底板中央耸立着冰雪覆盖的区域,幼发拉底河发源于这些区域中间,大地周围有水环绕,水之外有大山,以支持蔚蓝色的天穹。古巴比伦人把宇宙描述成一个分层次、有结构的整体。古埃及人同古巴比伦人一样,将宇宙看成一个整体,只是描述的方式不同。

无论是东方或西方的朴素的系统思想,尽管都力图把世界看做不可分割的、运动着的整体,但由于当时科学还没有发展起来,对世界的认识还建立在想象、猜测上,所以从总体上看仍然是不科学的、神秘的。

3. 科学的系统思想

古代朴素的哲学思想虽然强调对自然界的整体性、统一性的认识,但由于缺乏对整体各个细节的认识能力、观测和实验手段,科学技术理论贫乏,所以,古代朴素的系统思想不可能建立在对系统具体细节剖析的基础上,对很多事物只能看到它们的一些轮廓及表面现象,往往是“只见森林,不见树木”,对整体性和统一性的认识是不完全的。

15 世纪下半叶,近代科学技术开始兴起,力学、天文学、物理学、化学、生物学等相继从古代哲学中分离出来,获得了日益迅速的发展。近代自然科学发展了研究自然界的一整套方法,包括实验、解剖、观察以及数据的收集、分析与处理,把自然界的细节从总的自然联系中抽出来,分门别类地加以研究。这种研究自然科学的方法上升到哲学中,就形成了形而上学的思维方法——撇开了总体的联系来考察事物和过程。这种思维方法有其进步的一面,但是,正如恩格斯所指出的:“这些障碍堵塞了自己从了解部分到了解整体,到洞察普遍联系的道路。”

到了 19 世纪上半叶,在近代科学技术发展的基础上,自然科学取得了巨大成就,特别是能量转化、细胞学说、进化论这三项重大发现,使人类对自然过程相互联系的认识有了质的飞跃。

恩格斯指出:“由于这三大发现和自然科学的巨大进步,我们现在不仅能够指出自然界中各个领域内过程之间的联系,而且总的说来也能指出各个领域之间的联系了,这样,我们就能够依靠经验和自然科学本身所提供的事实,以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画。”这个时期的自然科学为马克思主义哲学提供了丰富的素材,为唯物主义自然观奠定了更加巩固的基础。这个阶段的系统思想有“先见森林、后见树木”的特点。

马克思、恩格斯的辩证唯物主义认为,物质世界是由许多相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的事物和过程所形成的统一整体,逐渐形成了辩证唯物主义的科学系统观,而这正是系统概念的实质。辩证唯物主义体现的物质世界普遍联系及其整体性的思想就是系统思想。这是“一个伟大的思想,即认为世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体。”恩格斯讲的“集合体”就是我们现在讲的“系统”及其特征,而他所强调的

“过程”，就是指系统中各个组成部分的相互作用和整体的发展变化。因此系统思想是辩证唯物主义的重要组成部分。

总之，系统思想在辩证唯物主义那里取得了哲学的表达形式，在运筹学和其他学科中取得定量的表达方式，并在系统工程应用中不断充实自己实践的内容，系统思想方法从一种哲学思维逐步成为专门的科学——系统科学。

4. 系统科学

系统科学的发展可分为两个阶段，第一阶段以二战前后运筹学、控制论、信息论和一般系统论等的出现为标志。

20 世纪 60 年代中、后期开始，系统科学的发展进入到第二阶段，出现了耗散结构论、协同学、突变论和超循环论等新的系统科学理论。

20 世纪 80 年代以来，非线性科学和复杂性研究的兴起，对系统科学的发展起到了非常积极的推动作用。1984 年在美国墨西哥州首府圣菲成立了以研究复杂性为宗旨的圣菲研究所 (Santa Fe Institute, SFI)。SFI 提出的复杂自适应系统 (Complex Adaptive System)，给系统科学界带来一类新的复杂系统，特别对促进复杂性的研究影响极大。

5. 系统的定义

“系统”这个名词最早出现于古希腊语中，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。其拉丁语表达“systema”，是“在一起”、“放置”的意思，很久以前就用来表示群体、集合等概念。但作为一个科学概念，20 世纪以来科学技术发展的结果，才使它的内涵逐步明确起来的。

那么究竟什么是系统呢？系统又有什么特点呢？系统的定义依照学科的不同、解决问题的不同及使用方法的的不同而有所区别，国内外关于系统的定义已达 40 余种。下面介绍一些对系统典型的定义。

1) 系统为整体

系统是处在一定联系中与环境发生关系的各组成部分的整体。(贝塔朗菲)

系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的、具有特定功能的有机整体。(钱学森)

系统通常是(a)体现许多各种不同因素的复杂统一体，它具有总的计划或旨在达到总的目的；(b)由持续相互作用或相互依赖联接在一起的诸客体的汇集或结合；(c)有秩序活动着的整体、总体。(《韦氏新国际字典》)

系统是(a)一组相联接、相聚集或相依赖的事物，构成一个复杂的统一体；(b)由一些组成部分根据某些方案或计划有序排列而成的整体。(《牛津英语字典》)

我国的《辞海》对“系统”这个词从自然辩证法、生理学、化学等几个方面给出了解释，认为：在自然辩证法中，“系统”同“要素”相对，是由若干相互联系和相互作用的要素组成的具有一定结构和功能的有机整体。系统具有整体性、层次性、稳定性、适应性和历时性等特性。

2) 系统为集合

互相联系着并形成某种整体性统一体的诸元素按一定方式有秩序地排列在一起的集合。(B. H. 萨多夫斯基)

系统是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。（《苏联大百科全书》）

系统为客体的集合，在这个集合上实现着带有固定性质的关系。（A. N. 乌约莫夫）

3) 系统要实现一定的功能

系统是互相作用的诸元素的整体化总和，其使命在于以协作方式来完成预定的功能。（R. 吉布松）

许多组成部分保持着有机的序，并向着同一个目标行动，就称做系统。（日本工业标准）

在本书中，我们使用如下定义：系统是由两个以上有机联系、相互作用的要素所组成，具有特定功能、结构和环境的整体。用数学语言，系统可以用如下一个五元组来表示：

$$\{S, R, J, G, H\} \quad (1-1)$$

其中， $S = \{s_i, i=1, 2, \dots, n\}$ 表示系统要素集合， R 表示系统要素间的关系集合， J 表示由具体的要素和关系决定的系统结构， G 表示系统功能， H 表示系统的环境。

从这个五元组可以看出，系统不等于它的各要素 $s_i, i=1, 2, \dots, n$ 的简单相加，系统是由要素有机地组织起来的。所谓“有机地”是指整个部分的、不可分割的、内在的、必然的联系。理解该定义有四个要点。

(1) 系统及其要素。系统是由两个以上要素组成的整体，要素是构成系统的最基本单位，因而也是系统存在的基础和实际载体。构成这个整体的各个要素可以是单个事物（元素），例如元件、零件、单个机器或者是个人、组织机构，也可以是一群事物组成的分系统、子系统等。简单的工具只有几个要素，钟表有几十个要素，而电视机有几百乃至几千个要素；一架喷气式飞机有几十万个要素，宇宙飞船有几百万个要素，而一座大城市算起来大约有几亿个要素。

社会愈发展，系统愈复杂，组成部分的数目和品种愈多。剖析系统的角度不同，可以认为系统由不同的要素所组成，但这并不意味着能随意划分系统要素。系统与要素之间的关系非常密切，它们相互依存、互为条件，而且也是相互作用的。它们的相互作用有如下 3 个方面。

第一，系统通过整体作用支配和控制要素。当系统处于平衡状态时，系统通过其整体作用来控制 and 决定各个要素在系统中的地位、排列顺序、作用的性质和范围的大小，统帅着各个要素之间的特性和功能，协调着各个要素之间的数量比例关系，等等。系统整体稳定，要素也稳定。当系统整体的特性和功能发生变化时，要素之间的关系也随之产生变化。例如，一个企业管理组织系统的整体功能，决定和支配着作为要素的生产、销售、财务、人事、科技开发等各分系统的地位、作用和它们之间的关系。为使管理组织系统的整体效益最佳，就要对各分系统之间的关系进行控制和协调，并要求各分系统充分发挥各自的功能。

第二，要素通过相互作用决定系统的特性和功能。要素对系统的作用有两种可能趋势。另一种是如果要素的组成成分和数量具有一种协调、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；另一种是如果两者的比例发生变化，使要素相互之间出现不协调、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。

第三,系统和要素的概念是相对的。由于事物生成和发展的无限性,因而系统和要素的区别是相对的。由要素组成的系统,又是较高一级系统的组成部分,是这个更大系统中的一个要素,同时又是较低要素组成的系统。例如,大学中的某个班级是由学生和老师等要素组成的系统,而此班级又是更大系统——年级系统的组成要素。正是由于系统和要素地位与性质关系的相互转化,构成了物质世界一级套一级的等级性。

(2) 系统和环境。系统与环境相互发生关系,它不是孤立的。任一系统又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。系统连同其环境超系统一起形成系统总体。

环境的变化必定对系统及其要素产生影响,从而引起系统及其要素的变化。系统要获得生存与发展,必须适应外界环境的变化,这就是系统对于环境的适应性,其相关内容将在1.2节进行详细介绍。

(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。因此,系统结构是系统保持整体性以及具有一定功能的内在根据。系统结构用数学语言表示为 $J = \{S, R\}$ 。在系统要素集合 S 给定的情况下,调整 R 中的关系,就可以改变或提高系统的功能。

(4) 系统的功能。任何系统都具有其存在的作用与价值,有其运作的具体目的,即都有其特定的功能,这时整体具有不同于各个组成要素的新功能,这种新功能受到环境和结构的影响。

系统功能用数学语言表示为 $Y = g(X)$ 。 X 为系统的输入要素,包括要素集合、关系集合和环境集合, Y 为通过系统的处理和转换功能而得到系统实现的功能。在系统要素集合 S 给定的情况下,调整 R 中的关系,就可以改变或提高系统的功能。系统的整体不等于组成它的各要素的简单相加,即

$$Y \neq \sum_{i=1}^n y(s_i) \quad (1-2)$$

其中, $y(s_i)$ 表示某个系统要素 s_i 的功能。

例 1-1 对于“大学”这样一个系统,我们用系统的定义分析如下。大学具有整体性,从人员构成上来看,它由学生、老师、后勤人员等组成一个整体。大学与外界保持着密切的联系,例如与学校上级主管各部门的沟通与交流,为企业、科研机构等输送毕业生等。从人员方面来看,后勤人员保障了学生及老师的衣、食、住、行,而学生与老师之间自然是教与学的关系。大学系统最基本的功能就是向社会输送人才,为社会做出其应有的贡献,这也是该系统运作的基本目的。

例 1-2 分析中国载人航天系统构成。载人航天系统的成功运行需要由 7 大要素系统协作完成。 $S = \{\text{航天员系统, 飞船应用系统、载人飞船系统、运载火箭系统、发射场系统、测控通信系统、着陆场系统}\}$ 。各要素子系统的功能分析如下:

航天员系统:选拔航天员和制备飞天号航天服。

飞船应用系统:利用载人飞船的空间实验支持能力,开展对地观测、环境监测,进行材料科学、生命科学、空间天文、流体科学等实验。

载人飞船系统:由轨道舱和返回舱构成,轨道舱呈椭圆形,是航天员工作、生活和休息的地方,返回舱是载人飞船唯一返回地球的舱段。

运载火箭系统：神舟七号采用的是长征二号 F 火箭。

发射场系统：为运载火箭、飞船、有效载荷提供满足技术要求的转载、总装、测试及运输设施；为航天员提供发射前的生活、医监、医保和训练设施；为载人飞船发射提供全套地面设施；组织、指挥、实施载人飞船的测试、发射及飞行上升段的指挥、调度、监控、显示和通信；组织、指挥、实施待发段和上升段的应急救生；完成运载火箭上升段的跟踪测量和安全控制；为航天指挥控制中心提供有关参数和图像；提供载人航天发射区的后勤服务保障。

测控通信系统：中国航天器测控系统已经形成了以西安卫星测控中心为中枢，以十多个固定台站、活动测控站和远望号测量船为骨干的现代化综合测控网。

着陆场系统：飞船在太空飞行后，从返回舱进入大气层开始，利用先进的无线电测量系统，对目标进行捕捉、分析和落点预报，然后组织人员迅速逼近返回舱，并且对返回舱进行处置，且将其安全运回基地。

中国的载人航天系统除了完成各类科学实验外，还实现了太空行走、与目标飞行器进行了自动空间交会对接和手动交会对接的功能，因此其功能远远大于各要素子系统的功能之和。

1.1.2 系统的结构

系统是由要素组成的，系统是要素的集合。如果只从集合的角度来研究系统包括了哪些部分，那就只研究了系统的组成。要了解为什么系统能保持它的整体性，则需要从各个组成部分之间的关联方式进行观察，也就是必须进一步研究系统的结构。系统结构决定系统功能，而系统结构由联系决定，联系由运动和流通决定。本节将详细介绍系统结构的定义、特点、形式、结构中的联系和信息与沟通等方面内容。

1. 系统结构的定义

人类所认识的客观事物，都具有一定的结构。不同层次的系统毫无例外地都存在着一定的结构。我们经常说到分子结构、人体结构、企业结构、产业结构、人才结构、知识结构等，这些都表明结构是普遍存在的。

系统结构是指诸要素在系统范围内的秩序，亦即诸要素相互联系、相互作用的内在方式，因此可以用数学语言表示为 $J = \{S, R\}$ 。系统的整体功能是由结构实现的，结构是构成系统的基本属性。

要素集合 S 可以分为若干子集 S_i 。例如一个学校，其要素集合 S 可以分为人员子集 S_1 ，固定资产子集 S_2 ，规章制度子集 S_3 等；而人员子集 S_1 又可分为教师子集 S_{11} ，学生子集 S_{12} ，管理人员子集 S_{13} 等，即

$$\begin{aligned} S &= S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup \dots \\ S_1 &= S_{11} \cup S_{12} \cup S_{13} \cup \dots \end{aligned} \quad (1-3)$$

不同的系统，其要素集合 S 的组成也不一样。例如中国载人航天系统要素集合 $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_6 \cup S_7$ ，其中 S_1 = 航天员系统， S_2 = 飞船应用系统， S_3 = 载人飞船系统， S_4 = 运载火箭系统， S_5 = 发射场系统， S_6 = 测控通信系统， S_7 = 着陆场系统；而 $S_3 = S_{31} \cup S_{32} \cup S_{33} \cup S_{34}$ ，其中 S_{31} = 轨道舱， S_{32} = 返回舱， S_{33} = 推进舱， S_{34} = 一个附加段。

在要素集合 S 上建立的关系集合 R ，在不失一般性的情况下可表示为

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cup R_4 \quad (1-4)$$

其中, R_1 表示要素与要素之间、局部与局部之间的关系, R_2 表示局部与全局之间的关系, R_3 表示系统整体与环境 H 之间的关系, R_4 表示其他各种关系。 R_1 中不但包含了同一层次上不同局部之间、不同要素之间的关系, 也包含系统内部不同层次之间的关系。对于不同的要素集合, 式(1-4)都是存在的, 需要做出具体分析。

2. 系统结构的特点

“结构”所揭示的是系统要素内在的有机联系形式, 而系统结构在整体性上又有它的若干特点。

1) 层次性

系统结构普遍地表现出层次性。系统结构的层次性是指, 组成系统的诸要素的各种差异包括结合方式上的差异, 使系统组织在地位与作用、结构与功能上表现出的等级秩序性, 形成了具有质的差异的系统等级, 层次概念反映这种差异的不同系统等级或系统中的等级差异性。

根据波尔丁(Boulding)提出的一般系统理论所述的层次概念, 以自然界所存在的系统为着眼点, 把物理界、生物界及社会界的所有系统分为9个层次, 并以此作为系统运行的基本单元。第一层次为静态结构系统, 第二层次为简单动态系统, 第三层次为反馈控制系统, 第四层次为细胞系统, 第五层次为原生社会系统, 第六层次为动物系统, 第七层次为人类系统, 第八层次为人类社会系统, 第九层次为超越系统。该理论表明层次高的系统除包含较低层次系统的特性外, 还具有一些较低层次系统所没有的特性。

系统结构层次也可从等级性和多侧面性两个方面来分析。等级性是指任何一个系统都可以从纵向上把它分为若干等级。如公司到工厂、车间、工段、班组、岗位等就是一个等级系统结构。多侧面性是指任何同一级的复杂系统, 可从横向上分为若干相互联系而又各自独立的平行部分。如公司经营活动的组织形式可以分为研发公司、制造公司、物流公司、销售公司等。

例 1-3 企业管理的层次分为战略计划层(高层)、经营管理层(中层)和作业层(基层)。大企业的中层又可以分为若干层次, 构成一座金字塔(见图 1-1)。

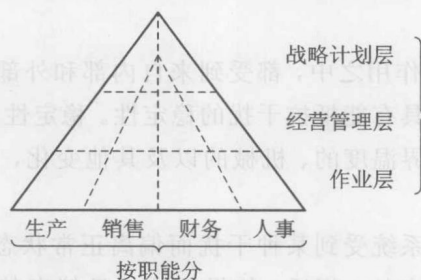


图 1-1 企业管理的层次

在实际管理工作中, 层次性并非是一成不变的。在一般情况下, 上一级指挥下一级, 下一级服从上一级, 下一级向上一级反映情况; 在特殊情况下, 也可以“越级指挥”、“越级反映情况”。我们把前者称为规范的层次性, 把后者称为不规范的层次性。后者并不是可