



系统工程实用教程

编著 姚德民 李汉铃

 哈尔滨工业大学出版社

系统工程实用教程

主编 王耀球 副主编 李国平

清华大学出版社

系统工程实用教程

姚德民 李汉铃 编著

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书系统地介绍了国内外有关系统工程的理论和方法,特别是我国改革开放以来在系统工程应用理论、可操作性强的系统分析技术以及航天工程预测、决策方面的新成果。书中还编入了大量实例和新资料。本书包括系统工程一般原理、系统整体协调理论和系统自组织理论、系统预测、系统分析、系统分析技术、系统环境分析、系统目标分析、系统结构分析、系统模型、系统最优化、系统设计和系统决策等内容。

本书可供高等院校管理工程、系统工程、技术经济、管理信息系统等专业的本科生和研究生使用,也可作为有关专业教师的教学参考书,技术干部、管理干部和企业家们的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

系统工程实用教程/姚德民,李汉铃编著.—3版.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.3

ISBN 978-7-5603-0340-6

I.系… II.①姚… ②李… III.系统工程-教材
IV.N945

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 032356 号

责任编辑 尹继荣

封面设计 姚殊格

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 21.5 字数 544 千字

版 次 2009 年 4 月第 3 版 2009 年 4 月第 10 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-0340-6

定 价 28.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

修订版前言

本书自 1984 年出版以来,已经印刷了 9 次,其间在第二次印刷前我对全书作了校订和局部补充。20 余年来,承蒙管理学术界和企业界的青睐和支持,印数得以不断扩大。现余书告罄,急待重印。20 余年间,随着管理范围的科技进步和我国改革开放政策不断深入与实施,我国的经济有了极其迅猛的发展,因而也促进了系统科学和系统工程发生了巨大的变化。特别是从引入市场经济体制以来,这种变化尤为深刻。为了适应这种变化所带来的新形势和新要求,我们颇感有对原书进行一次修订的必要性。同时,我们在此期间,不论从教学还是科研方面也积累了不少经验和成果;而国内外的大量新资料,也颇有吸收的价值。这是本书进行修订的可行性。在编者的共同努力下,全书修订工作已告完成。

总括起来,修订本具有以下特点:1.修订本仍以原书框架为基础;2.增加了以创新科研成果为内容的系统应用理论部分(第二章);3.增加了可操作性强的系统分析技术部分(第五章);4.增加了国内外具有航天工业特色的实例(第三、四、十二章);5.补充了新的系统模型(第九章)。因而修订本无论在理论上还是实践上都较原书有较大的改进,内容更丰富了。

这次参加本书修订的人员,除原书作者姚德民、李汉铃外,还有李旭、董沛武,以及江沿滨、梁俊国、杨远涛、郭喜江等同志。由姚德民同志策划和统编全书。

必须说明的是,修订本中的第二章第一节(开发新产品整体协调理论)和第五章第四节(新产品概念开发技术)、第五节(新产品开发策略及策略组合技术)、第六节(新产品开发策略组合的协调分析)、第七节(新产品开发策略组合协调分析案例),是在国家自然科学基金项目——开发新产品整体协调理论研究(编号 79170027)资助下完成的科研成果的基础上写成的,故特在此注明。

在修订本出版过程中,我们得到了哈尔滨工业大学出版社有关领导和同志的关心与支持,在此深表谢意。

由于时间仓促和作者水平所限,书中难免有错误和不足,敬希广大读者批评和指正。

主编 姚德民

2009.3

目 录

第一章 系统工程一般原理	1
第一节 引言.....	1
第二节 系统的概念、形态和特征	6
第三节 系统工程的概念、学科性质及其定义.....	14
第四节 系统工程的程序和方法	17
第五节 系统的控制	21
第二章 系统整体协调理论和系统自组织理论	25
第一节 开发新产品整体协调理论	25
第二节 系统自组织理论	37
第三章 系统预测	54
第一节 引言	54
第二节 经济预测	56
第三节 科学技术预测	73
第四节 高科技领域预测	80
第四章 系统分析	98
第一节 引言	98
第二节 系统分析的内容、准则和程序	100
第三节 系统分析目的的选定和评价标准.....	102
第四节 系统分析举例.....	105
第五章 系统分析技术	138
第一节 层次分析法.....	138
第二节 主成分分析.....	142
第三节 模糊聚类分析.....	147
第四节 新产品概念开发技术.....	152
第五节 新产品开发策略及策略组合技术.....	160
第六节 新产品开发策略组合的协调分析.....	163
第七节 新产品开发策略组合协调分析案例.....	167
第六章 系统环境分析	173
第一节 环境分析的意义.....	173
第二节 环境因素的分类.....	173
第三节 物理和技术环境.....	174
第四节 经济和经营管理环境.....	176
第五节 社会环境.....	178
第六节 系统与环境的边界.....	180
第七节 系统环境分析举例.....	180
第七章 系统目标分析	182
第一节 系统目标分析的作用.....	182
第二节 系统目标分析中的几项要求.....	182
第三节 目标集的建立.....	183

第四节	目标冲突和利害冲突	186
第五节	多目标的分析	188
第八章	系统结构分析	191
第一节	系统结构的概念和内容	191
第二节	系统要素集的分析	192
第三节	系统相关性的分析	192
第四节	系统阶层性的分析	194
第五节	系统整体性的分析	195
第九章	系统模型	199
第一节	引言	199
第二节	系统模型的形式和作用	199
第三节	构造模型中应注意的问题	202
第四节	总体规划投资模型	203
第五节	企业经营管理模型	204
第六节	投资出产模型	209
第七节	前沿生产函数及技术效率评价模型	213
第八节	模拟模型	218
第九节	用工程统计法建立卫星工程费用模型	228
第十节	新产品工艺切换参数协调优化模型	233
第十章	系统最优化	239
第一节	目标函数及约束条件的分析	239
第二节	目标函数的最优化方法(一)	246
第三节	目标函数的最优化方法(二)	251
第十一章	系统设计	261
第一节	系统设计的基本原则	261
第二节	系统设计程序	262
第三节	综合与分析	265
第四节	系统评价	267
第五节	系统设计及实例	277
第十二章	系统决策	286
第一节	引言	286
第二节	常用的决策方法	290
第三节	一般决策问题	292
第四节	多阶段决策	302
第五节	贝叶斯决策与马尔柯夫决策	308
第六节	多目标决策	312
第七节	决策方案的定量评估模型(DARE)	320
第八节	模糊决策	325
第九节	风险决策	330
参考文献		337

第一章 系统工程一般原理

第一节 引言

一、系统科学与系统工程

科学也同世间的一切事物一样,是矛盾的对立统一体。矛盾的产生和解决,就使得科学进入了新的发展阶段。科学的发展概括起来可分为三个阶段:古代综合发展阶段,近代分析发展阶段,现代综合发展阶段。系统科学就是科学发展到现代综合发展阶段的产物。古代综合发展阶段是指近代自然科学形成的前期阶段。这个阶段的自然科学往往把科学、哲学、宗教和迷信混杂在一起。但是,由于宇宙的统一观,使人们试图把五光十色的世界看成一个整体,寻求其共性和统一。尽管在这种看法中,存在着许多荒诞不经的东西,但是这种对待世界上多元现象的综合看法,不但没有阻碍,相反却促进了思维和认识的深入,促进了科学的发展,产生了许多综合型的科学巨人,如亚里斯多德、赫拉克利特等。这是第一个综合发展阶段。随着科学的发展,资料的积累越加丰富和广泛,专门化的倾向越来越明显,那种综合的观点逐渐被丢掉了,代之而来的是分析发展阶段,这是现代科学发展的奠基阶段。它使科学在纵深方向前进了一大步,人类的大量科学成果主要是这个阶段的产物。但是由于分析发展的结果,科学家的视野越来越窄,问题越搞越专。科学家之间也越来越不了解,致使缺乏交流的共同语言,因而使得某些具有共性的科学成果无法得到交流和推广,相同或类似的原理被多次重复研究,造成科学研究中人力、物力、时间的浪费。同时,由于对客观上本来是有机联系的整体(自然现象和社会现象)的人为的割裂,很容易造成对事物的片面性认识。这就是形而上学思维产生的根源。因而也阻碍了科学的进一步发展。因此,现代科学的发展,比过去任何时候都更要求在各种科学门类之间,进行更多的相互联系和相互渗透,这就使科学进入了综合发展阶段。系统科学就是科学高度综合发展阶段的产物,这种才能、知识和科学的综合形成了一种趋势,这种趋势的表现之一,就是在许多学科的交界处出现新的学科(边缘科学)。这样,从本世纪 20 年代初,就出现了一种在复杂的多元现象中寻求统一理论的新尝试。比如在自然科学中的振动理论。众所周知,声波和水波是振动,电磁波和固体波也是振动,这是不同物质的振动。在寻求不同质的振动中,人们综合出一切振动的共性,比如波长、振幅、频率、相位等。从而产生了这一新理论。系统科学也是这种寻求事物共性的一门科学。贝塔朗菲的一般系统论就是在这样的条件下孕育形成的。早在 1924~1928 年间,他就曾多次发表文章表述了系统科学的思想,其主要目的是力图确立适用于系统的一般原则。贝塔朗菲的一般系统论的几个基本观点是:①系统观点。认为一切有机体都是一种自然整体——系统,要解释复杂现象不仅要分析它们的组成部分,而且要估计到这些组成部分之间联系的总和;②动态观点。认为一切生命现象本身都处于积极的活动状态,活的东西的基本特征是组织。他提出了开放性系统理论,认为任何活的系统都是与环境发生物质、能量交换的系统;③等级观点。认为各种有机体都按严格的等级组织起来。生物系统是分层次的,从活的分子到多细胞个体,再到超个体的聚合体,层次分明,等级森严。

一般系统论在 40~50 年代,由于在军事和通讯控制中的应用,获得了较大的发展,并逐渐

形成了系统工程。系统工程是系统科学在现实应用领域中的一个重要分支。

二、系统工程的对象及其发展

系统工程是近卅年发展起来的一门新兴的综合性学科。它研究人类进入现代化社会后所面临的各种综合性问题。这些问题涉及到范围广阔的领域,比如资源枯竭、人口、粮食、环境污染等问题。这些问题还涉及到许多事物之间的相互关系和相互作用。比如,捕鱼船队和鱼类生态社会之间的相互关系,一旦捕鱼业对鱼的总尾数开始产生决定性影响的时候,就不可估量地使问题复杂化了。系统工程侧重于研究事物的组织和发展,这是一切事物都具有的本质方面。从事物的组成要素上看,生物和非生物的区别只在于结构、联系、要素的相互关系和组织。物理和化学定律不反映这种相互关系,生物学、生理学和心理学的规律,也不能完全解释这些问题。系统工程正是由于探索事物的这些本质才得到了发展。系统工程又是研究创造过程合理化的技术。人们在开始研究新的对象时,总是力求用不同的观点来看待它,从不同的角度去接近它。系统应当在几个不同的功能空间内得到描述。而这些空间又应在某个具有更大共性的“超空间”内相互协调。这个空间的合成能容许发现新的实质,看到通常看不到的东西。所谓创造过程合理化的技术,正是从这个意义上讲的。系统工程属方法论范畴,是观点、程序、手段和方法的结合,因此它是以解决现实问题为特点的。当然,只是方法还不能解决问题,还需要专业知识、对情况的了解和逻辑学等方面的有效配合。系统工程还是一门正在发展中的学科,它还很不完善。迄今为止,人类所知道的有关组织、管理、联系和发展的东西,大多带有经验和表面性质,用严格的质和量的关系来论述组织与发展的规律,离我们还很遥远。在未知的海洋中所建造的知识岛屿和桥梁,还是摇摆而纤弱的。比起许多古典的学科,它还是一个刚刚学步的幼子。但是由于它的学科性质的价值而使它具有极大的生命力和广阔的前景。

系统工程有这样几个发展阶段^{[1][2]}:①F·泰勒在1911年发表的“科学管理法”一书中,提出了具有现代含义的系统概念,反映出现代科学、技术、经济和管理系统性发展情况。②第二次世界大战中,由于战争需要,在资源分配、工程进度、运输路线和军事对策等方面进行了大量的分析,提出了最优解决问题的概念和方法,产生了运筹学。上述两个概念,是系统工程赖以形成和发展的基础。③1945年,在美国军部建立了兰德公司,这是从事规划、政策、发展等的综合性的系统开发公司。它总结了第二次大战期间的大量高级数学方法,并在经营战略和各种系统开发中取得了大量成果,奠定了系统工程的初步实践基础。④1957年,美国学者顾杰(H·Goode)和马可尔(R·Machol)合著的系统工程学(Systems Engineering)出版,为这门学科第一次命了名,从理论上首次进行了总结。⑤1960年前后,系统工程在各个领域内开始形成独立的解决问题体系,扩大了理论和实践的影响范围。⑥1969年美国阿波罗宇宙飞船登月。这一宇宙开发计划的成功使系统工程名扬四海,因为这项计划和各个环节,包括研制、试制、生产、发射、运行、回收等,都运用了系统工程的理论和方法,从而引起人们的关心和重视。⑦1972年,成立了国际应用系统分析研究所(IIASA)。这是世界范围的研究人类面临的许多重大问题(如资源、能源、粮食、人口、环境污染等)的科研组织,有美、苏、英、法、日、德等17个国家参加。这个组织的建立,意味着系统工程的发展已经带来了全世界性的影响。现在,从自然科学到社会科学,从技术问题到经济问题,从宇宙开发到一台机器的研制,从城市建设到公害处理,从生产问题到生活问题,都广泛地应用着系统工程学的方法。

表 1-1

系统工程学的应用范围及应用举例

应用范围		应 用 举 例
自然对象系统	宇 宙	宇宙开发、宇宙飞行、通讯卫星等
	气象、灾害	天气预报、地震预报、防灾、防台风、防洪水、震灾对策、人工气象开发等
	土地、资源	土地开发、海洋开发、资源开发、能源开发、太阳能开发、地热开发、潮力开发、治山治水、河流开发、农业灌溉、水库流量控制、土地利用、造田、环境保护等
	农、林、渔业	农业资源、林业资源、渔业资源、人工农业等
人体系统	生理、病理	生理分析、生理模拟、病理分析、病理模拟、病情情报检查等
	脑、神经、心理	思考模型模拟、自动翻译、人工智能、机器人研究、控制论模型、心理适应诊断、职业病研究等
	医 疗	自动诊断、自动施疗、物理治疗、自动调剂、医疗工程、医院情报管理、医院管理、医疗保险、假手足、人工内脏等
产业系统	技术开发	新技术开发、新产品开发、技术情报管理、原子能利用、最优设计、最优控制、过程模拟、自动设计、自动制图等
	工业设施	发电厂设备、钢铁厂设备、化工设备、过程自动化、机械自动化、自动仓库、工业机器人等
	网络系统	电力网、配管分配、安全回路、控制回路、道路计划、情报网等
	服务系统	铁道航空座席预约、旅店剧院预约、银行联机系统、自动售票、情报服务等
	交通控制	航空管制、铁道自动运行、道路交通管理、新交通系统等
	经营管理	经营系统、经营模拟、经营组织、经营预测、需要预测、经营计划、生产管理、资财管理、在庫管理、销售管理、财务管理、车辆分配管理、经营情报系统、事务工作自动化等
社会系统	国际系统	防卫协调、国际能源问题、粮食问题、国际资源问题、国际环境保证、国际情报网、发展中国家的开发等
	国家行政	经济预测、经济计划、公共事业计划、金融政策、保卫、治安警察、外交情报、经济情报服务、司法情报、行政管理、邮政职业介绍等
	地区社会	地区规划、城市规划、防灾对策、垃圾处理、地区生活情报系统、公用计划、老年人和残废人对策、地区医药等
	文化教育	自动广播、组号自动编成、计算机辅助教学、文化教育情报服务、教育计划、自动检字、自动印刷、自动编辑等

表 1-1 表明,系统工程的应用范围是非常广泛的,这种应用的广泛性说明了这门学科的价值和生命力。

三、系统工程的典型实例

为了阐明系统工程的思想、性质和方法,先看下列典型实例。

例 1 都江堰工程。地处我国四川省灌县境内的都江堰工程是举世闻名的。这是公元前 250 年由蜀郡太守李冰父子带领当地人民修建的一项防洪灌溉工程。据考证,四川的美称——天府之国的得名,来源于都江堰工程。在这项工程兴建之前,四川的情况可用这样三句话来概括:“洪水泛滥”、“土地龟裂”、“民不聊生”。完全不是什么天府之国。李冰等人通过分析,认识到“洪水”意味着水太多了;“龟裂”说明水太少了。那么能否将多余的水送到缺水的地方去?这就是修建都江堰这个系统工程的思想。为了达到这个目的,工程分三个部分:分水工程,这是将

岷江分流为内江和外江的鱼嘴工程,通过分流,使多余的水进入内江,不仅能用于灌溉,而且达到防洪目的;**引水工程**,它将玉垒山劈开,将进入内江的水引进灌溉渠道,即有名的宝瓶口工程。通过引水的渠道工程,解决了“多水”与“缺水”的调节问题;**分洪排沙工程**,它处于分流后的内江与外江之间,由飞沙堰和人字体工程组成。这两级溢洪道,控制了内江水位。它们前后呼应,略高于两江水面,而内江水面又高于外江水面,因此,水小为岸、水大为口,流石沉堰、洪落沙收。这项工程解决了进入灌溉渠道的水量问题,多则为害,少则不足以灌田;又解决河道的输通问题。不搞排沙,整个工程就无法进行。都江堰工程是世界水利工程史上的奇绩,是伟大中华民族智慧的象征。三个部分构成了一个整体,从而解决了川西平原的防洪灌溉问题。从今天的观点看,这是一个完整的系统工程。因为它的设计体现了系统思想,应用的知识是综合性的,解决的问题则带有全局优化的性质。当然,这种系统思想尚处于初级、朴素的阶段。

例2 皇宫修复工程。宗真宗祥符年间,由于皇城失火,宫殿被全部烧光。皇帝命一个名叫丁渭的大臣全权负责皇宫的修复工程。这样的工程怎样才能修复得又快又好呢?经过反复考虑,他提出了一套完整的施工方案:首先是**挖沟**,把皇宫前面原有的一条大街挖成沟渠,用挖出的土烧砖,从而就地就近解决部分建筑材料问题;其次是**引水**,即把已挖好的这条沟渠同开封附近的汴水接通,形成航道,运进砂石木材等,使用了当时最经济有效的运输方式——水运,节省了大量的人力、物力和时间;最后是**填沟**,在皇宫修复后撤水,并用废弃物填沟,修复了原大街。第三次利用了这条沟渠,利用了废物,又节约了运输。这里体现出来的系统工程思想是很典型的。它从始至终把皇宫的修复工程看做一个整体,把挖沟、引水和填沟三个环节巧妙地联结起来,不仅从中体现出快、好、省的要求,并有步骤地达到了预期的目的。

例3 泰勒的科学劳动组织。泰勒把工人的劳动过程分成三个方面进行分析:一是**工序分析**。即解决工序划分和组成的合理性问题。工序是一切工业生产的最基本的组织单位,是生产工艺流程和组织管理过程相统一的环节。抓好了工序分析,就为建立科学的劳动组织打下了基础;二是**动作分析**。研究完成各工序的合理动作问题。如工作地布置,双手动作交叉配合等。动作是劳动过程的具体化。劳动过程的高效率和组织过程的合理性就体现在动作的设计上。泰勒在测试和研究若干工人在相同工序动作的基础上进行计算和选优,整理和设计出一套最合理的动作,即最优的动作组合,同时拍摄电影,用以重新训练工人,从而提高劳动生产率;三是**时间分析**。完成工序要费一定时间,有机动时间、手动时间、准备结束时间、自然需要时间等等。动作分析只解决了操作时间的合理消耗问题,而下余的时间部分是否达到合理,则通过时间分析(测试和定量计算)来解决。这三项分析既有定性分析,又有定量分析,既有整体协调,又有单项的比较和选优。这三个方面实际上反映了劳动组织的有机联系的三个重要组成部分,是劳动组织系统的整体分析。通过这些分析,使劳动组织达到完整、合理、科学。这是系统分析的一个范例。

例4 ATLAS(宇宙神)导弹工程。1954年美国政府决定将已研制的ATLAS导弹的射程提高到五千英里。为达到实际使用的目的,必须建立导弹系统、发射系统、地面系统等分系统。其中每个分系统又由若干个分支系统组成,如导弹系统就包括弹体、弹头、火箭、动力系统、制导系统等。这三个分系统形成了一个整体,这就是ATLAS导弹工程系统。同时,每个部分必须恰当的选择,保持合理的关系,以满足整体要求。比如从导弹系统看,导弹形式、火箭级数、燃料种类和制导方法等。只有各自的技术参数协调于整体时,保证物理上、功能上和计划上的全部接口都配合得当,才能使该系统设计达到最优。不仅如此,各分系统之间也要保持一定的合理关系,如导弹性能、可靠性、保养维护、后勤供应、发射场的安全、人的因素等统筹起来,才能达

到总体正常运行的要求。因此,ATLAS 导弹工程是一项典型的系统工程。

通过上述实例能够看出,什么样的工程可以看做是系统工程。系统工程是怎样提出问题、归纳问题和解决问题的。现在就来概括一下这些实例的基本思想:①实例中有防洪灌溉工程、土建工程,也有劳动组织和技术系统工程。这就是说,一般涉及到的科学、技术、工程、生产、经济、管理等方面的比较复杂的事物,都可做为系统工程来看待和处理;②做为系统工程来看待和处理的首要条件就是把要研究和处理的事物看做是一个系统、一个整体,不论是例 1 的空间结构分布,还是例 2 的时间过程,或者是生产技术工艺过程、组织管理过程,都要这样去看待;③在把一个事物当做系统来看待的指导思想下,就要找出这个系统或整体的合理组成部分以及组成部分之间的合理关系,比如都江堰工程的分水、引水和分洪排沙三项工程,不仅是都江堰工程系统的合理部分,而且它们之间的配合协调关系也为系统正常运行之所必需。通过建立这些组成部分及其合理关系来达到整体功能的要求;④解决问题要有一个合理步骤或程序,这是系统工程本身的又一重要要求。系统性不仅表现在整体协调关系上,还反映在事物处理的步骤上。从某种意义上讲,解决问题的程序本身也是一个系统;⑤无论对整体,还是对过程都应有协调、选优以及从定性解决到定量解决问题的思想。协调、选优应贯穿于解决问题的全过程;而定性和定量解决问题则反映事物存在和发展的规律。这是因为世间的任何事物都是一定量和一定质的结合。片面强调哪个方面都将不利于问题的解决。

四、系统工程产生和发展的客观基础

任何一门学科的产生和发展都不是偶然的,而必有其社会、经济、科技的根源。系统工程作为一门新学科的诞生也是有一定的物质基础和条件的。这正象牛顿力学不能出现在 16 世纪,而爱因斯坦的相对论不能出现在 19 世纪一样。

系统工程产生和发展的客观基础是:第一,近年来,在自然界和社会、政治、经济、管理、经营以及国家关系等各个方面,组织上日趋复杂,出现了综合性很高的相互制约和相互联系的系统性事物。它们突破了区域性、行业性、学科性的界限,成为一类具有独特性质的问题。每个部门、每个行业、每个学科,为了进行工作和研究,都再也不能不考虑这些外界的约束和联系。过去使用的比较狭隘的孤立的方法已经不能解决问题,而要求有一种能适应这种新情况的新方法。这就是从系统的角度去观察、思索、分析、解决问题的方法。这种要求是系统工程学产生的客观基础。第二,近三十年来,由于通信技术和信息科学的发展,特别是仙农的信息论和维纳的控制论的发展使社会生产和经济过程的各环节得以迅速地有机地联系起来。同时由于电子计算机技术的高度发展,使情报的收集、存贮、加工、传送的能力大幅度增加,大大缩短了空间和时间的界限,使人们有可能较全面地掌握、处理和传送大量的情报,并在较短时间内对综合性很大的系统性问题做出判断和决策。这种情况刺激了系统方法的急剧发展。第三,近年来,随着现代数学,特别是运筹学、计算方法和计算技术的出现和发展,现代化的最优化技术体系已经形成。这使大型复杂问题的定量分析和运算、最优化决策和最优化管理成为可能。第四,由于科学技术和工业生产的高度发展,使各种设备和仪器高功能化、多功能化、小型化、自动化,这为自动控制和自动检测、远距离传输等提供了可靠的技术手段。同时,装备和系统的稳定性、可靠性、精确度也不断提高,这使系统问题的研究和处理有了可靠的物质基础,因而促进了系统工程学的发展。

第二节 系统的概念、形态和特征

上节的一般介绍,作为了解问题的开端。为正确了解和认识系统工程这门新学科,必须对系统的概念、形态和特征进行深入的探讨。由于系统工程学的主要对象是人造系统,所以这些讨论也以人造系统为出发点。

一、对系统概念的一般认识

在自然界和人类社会中,普遍存在着由若干个环节组成的链状事物。这种环环相扣、动此及彼的链状事物就是我们常说的系统。比如太阳系是由恒星、行星、彗星、卫星等环节组成的链,这是一个在万有引力定律作用下的力学系统。在地球上存在着许多自然系统,如海洋系统、气象系统、矿藏系统、生态系统等等。这些自然系统就是组成地球这一链状物的环节。在人类社会中存在着生产系统、经济系统、消费系统、科学系统、技术系统、教育系统、通信系统、交通系统、医药系统、服务系统等等。这些系统就是人类社会这个大系统的组成环节。当然,这些系统本身又是由许多个环节组成的。比如,一个交通系统是由线路、车站、车辆、车库、修理厂、司机、乘务人员、管理员、业务组织、管理机构、科研机构等环节组成。从这里可以看出,系统的概念是相对的,而不是绝对的。许多小系统可以组成一个较大的系统;许多较大的系统又可组成一个大系统;许多大系统又可组成更大的系统。它没有一个绝对规模的界限,有了这个认识就可避免在研究系统时所易于造成的局限性。同时,又可看到,系统的存在具有普遍性,大至宇宙,小到原子,它们都是链状事物,都有其组成环节。因此系统概念的普遍性,说明了系统科学和系统工程学科的重要性。系统概念是打开世界奥秘的一把金钥匙。

认识系统的链与环的关系还有更深的意义。我们在工作、学习和生活中经常碰到的成功与失败,其促成条件应从链与环之间关系的系统观点来看。这有二个方面的因素:一是是否认识到所要处理的这一事物的全部组成环节,忽视或没能看到其中的一个环节就会碰钉子;二是是否认识到这些环节相联结的部分的形式和特点,这在不同系统中是有差别的,不认识到这些,也照样会碰钉子、遭失败。比如烧柴—森林—土地沙漠化的关系;牛奶—三叶草—猫的关系;除麻雀—虫害—水果的关系等等,都是分析这种成功—失败链环中的实际例子。因此,从系统观点看,要想把事情办得好一些,多一些成功而少一些失败,就必须培养人的系统意识,这不论在科研、技术、经济、管理、国家事务、国际关系上莫不如此。所谓系统意识,就是在思考、研究、探索和处理某一事物时,要有意识地把它看成一个系统。即它不是一个简单的存在,而是一个系统性的存在,明确链—环关系,并从系统内相关的角度去分析它、认识它。这样一种思考问题的方法如能形成,那将是收益甚大的。举例说明系统意识:我们每个人都要吃饭。做饭的粮食是到粮店去购买的。为什么到粮店能买到粮食呢?其原因,在这个城市内存在着一个庞大的粮食供应系统。这个系统包括种粮、购粮、存粮、粮食加工、粮食分配、粮食运输、粮食管理等环节。而粮店只是其中的一个环节。能买到粮食,说明所有这些环节都能正常运行。如果这些环节中任何一个环节出了问题或没能有机地配合行动,那么,从粮店是买不到粮食的。这就是购粮问题上的系统意识。一个城市的粮食管理干部,如果他没有系统意识,那么这个城市的粮食供应是不会搞好的。推而广之,蔬菜、水果、商品等等,都是一个供应消费系统。当前在供应上出现的许多问题,都与没有建立或忽视系统意识有关。

二、系统的概念及其发展

人们对系统的认识有一个发展过程。系统(System)一词最早出现在古希腊语中。它的原词 Syn 有“共同”和“给以位置”的含义。即系统意味着事物的共性部分和每一事物在总体中给以它应占据的位置。尽管这个概念还是很原始的,它的深刻含义并不是能为今天许多人所接受,因而常常导致许多错误的产生。随着科学技术的发展,系统被赋予进一步的含义,如系统是:“有组织的和被组织化的全体”,“结合着的全体所赖以形成的诸概念和诸原理的复合体”,“以规则的相互作用又相互依存的形式结合着的对象的集合”。就是说,系统是一个全体,它的组成部分是有组织的,相互间有依存与作用的关系。同时,系统不仅有实体部分,还必须有所赖以形成的概念部分。事实上,任何一台机器、仪表、一个工厂和学校,都是在一定的指导思想和方针下形成的。强调实体部分而忽视概念部分或相反,都会导致对系统概念的曲解,从而造成问题处理不当所带来的损失。系统概念的进一步发展,使人们认识到,系统整体的行动是有确定的目的的。在日本工业标准(JIS)中,系统的含义是“多数构成要素保持有机的秩序(即有序化),向同一目的的行动者”。这一认识对系统开发有深刻意义。任何人造系统的开发和建立,离开明确的目的性,必将导致要求上的模糊和措施上的不利,从而带来先天性的不足。系统概念的更新和发展,是指出系统的计划性质。根据 Jonson 等人的定义,“系统是为按计划完成特定目标而设计的结构因素安排序列。”这里包含三个思想:第一,作为系统的设计标准需要明确应该完成的目的和目标;第二,必须进行构成因素的设计,建立它们的序列;第三,能量和财物等的输入必须按计划分配。这突出指明,系统在完成特定目标时,必须有物质、资金、能量等的计划安排与保证。

应当指出的是,人们对系统的认识并没有结束,因为系统概念还在发展。这是讨论系统的概念时必须予以注意的。

三、系统的形态

系统是以不同的形态存在的。根据生成原因的不同,系统可分为自然系统和人造系统。自然系统是自然界自发生成的一切物质和现象,与人类活动无关。人造系统是人类应用自然规律建造的,以自然系统为基础的一切满足人类生存和发展需要的人造物。人造系统以破坏自然系统为前提,同时改变自然系统的某些状态。因此人造系统与自然系统之间存在着一定的制约关系。破坏或超出了一定界限,人类就将受惩罚。根据其组成性质,人造系统又可分为实体系统和概念系统。实体系统是概念系统的形态化,又是实现概念系统要求的运行体。概念系统是实体系统的“灵魂”,而实体系统是概念系统的“躯壳”。只有两者结合,人造系统才能得以建立和不断完善。根据系统状态是否随时间变化,实体系统又可分为静态系统和动态系统。静态系统的状态不随时间变化而改变,动态系统的状态是时间的函数。静态系统是动态系统的基础,动态系统则通过状态的改变实现静态系统的功能。根据有无环境交换关系,系统又可分为开系统和闭系统。开系统是与环境有物质、能量、信息交换的系统;而闭系统则没有这种交换。开系统可以通过交换降低自身的“熵”水平;闭系统则不能。因此,建立有生命力的系统,必须是与环境有交换能力的开系统。此外,根据某些特定的标志,系统还可分为因果系统、目的系统、控制系统、行动系统、对象系统等。这些系统形态在某些具体的系统建造时将有其特定的功用。系统的形态及特点可参见表 1-2。值得指出的是,还有一种系统形态,它存在于自然界和人类社会,但尚未被人们发现或认识,我们可以称之为潜在系统。比如,森林、草原和耕地之间的关系被证

表 1-2

系统的形态和特点

系统形态	定 义	特 点 与 相 互 关 系	实 例
自然系统	由自然物(矿物、植物、动物、海洋)等组成的系统	1. 自然形成的 2. 是人造系统的基础 3. 一般是环境系统	1. 海洋系统 2. 矿藏系统 3. 生态系统 4. 大气系统
人造系统	人工生成的系统	1. 利用自然规律建造 2. 以破坏自然系统为生成基础 3. 人类需要的系统皆属之	1. 工程技术系统 2. 管理系统 3. 科技系统
实体系统	由物质实体组成	1. 以硬件为主体 2. 以静态系统及行动系统的形式表现	1. 人机系统 2. 机械系统 3. 电力网 4. 建筑物
概念系统	由非物质实体(概念、原理、方法、制度)等组成	1. 以软件为主体 2. 为实体系统提供服务	1. 科技系统 2. 教育系统 3. 程序系统 4. 制度
静态系统	状态不随时间改变的 系统	1. 没有输入与输出 2. 属实体系统 3. 是动态系统的基础	1. 车间平面布置系统 2. 教室布置 3. 封存的设备、仪器
动态系统	状态随时间改变的 系统	1. 有输入和输出及转化过程 2. 一般有人的干预 3. 需概念系统的配合	1. 生产系统 2. 社会系统 3. 服务系统
闭系统	与外部环境没有交 换关系的系统	1. 不向环境输出也不从环境输入 2. 为研究目的做成	1. 静态系统 2. 没投入使用其他技术系统
开系统	与外部环境有交换 关系的系统	1. 从环境输入向环境输出 2. 系统状态受环境变化影响 3. 大部分人造系统属之	1. 生产系统 2. 销售系统 3. 社会系统 4. 技术系统
因果系统	输出完全决定于输 入的系统	1. 系统内容由单一因素决定,没有转换过程 2. 一般的测试系统属之	1. 信号系统 2. 测试系统 3. 记录系统
目的系统	按给定目的行动的 系统	1. 系统有达到目的的 必要手段 2. 有自适应能力	1. 生产系统 2. 管理系统 3. 军队
控制系统	有控制功能和手段 的系统	1. 应用反馈原理 2. 有测度和比较机构	1. 自动化系统 2. 自适应系统 3. 人体系统
行动系统	把达成目的的行动 做为组成要素的系 统	1. 不以组成要素的特 征而以行动特征相区 别 2. 以组织体为特征	1. 军事系统 2. 劳动系统 3. 侦察系统
对象系统	按对象区分的系统	1. 因对象不同而各有 特点 2. 大部分是人参加的 复合系统	1. 经营系统 2. 作业系统 3. 管理系统

明是一个系统关系。但是还有许多规律未被人们所发现或重视。目前全世界范围(特别是我国)的水土流失和土地沙漠化,已构成对人类生存和发展的威胁。因此对各种潜在系统的研究和发现,具有重要的科学意义。实际上,从某种意义上说,科学就是发现、探索自然界与人类社会的各种潜在系统中发展起来的。

对系统形态的分析能使我们明确各种系统的特点以及它们之间的关系。从表 1-2 中可以看出,尽管系统形态千差万别,但对人类活动起重要作用的是实体系统和概念系统相结合的人造复合系统,这是现实世界存在的各种系统中的大多数。在分析设计具体系统时,必须从设定的目的出发,选择对应的对象系统,并根据对象系统的特点和要求,建立其静态实体系统,辅以相应的计划、制度、程序和管理(或控制),从而使之转化为动态系统,生产出产品,并在销售系统的组织计划活动中,实现系统设定的目的。从上述分析中可以看出:从设定目的到最后实现系统的目的,是建立实体系统和概念系统的过程,又是两者顺次结合走向实现目的的过程。从系统形态分析中还可以看出,现实中运行的系统都是几种系统形态的结合物,参见图 1-1。

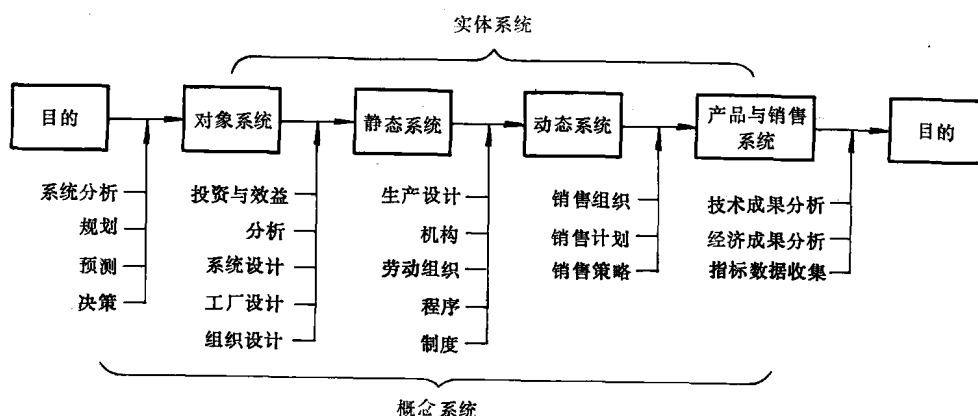


图 1-1 实体系统与概念系统的相互关系

四、系统的特征及定义

在研究系统的概念和系统形态的基础上,就可概括出系统的特征。明确系统的特征,是我们正确认识系统的关键。作为一个系统,它应具备六大特征:

1. 目的性(或目的指向性) 人造系统皆具有目的性,而且往往不止一个目的。建造系统而无明确的目的,这种系统就不应存在。这是系统设计的一个重要问题。比如,企业经营系统在限定的资源和现有职能机构的配合下,它的目的可能是完成和超额完成国家计划,达到规定的质量指标,成本、利润指标,等等。一个技术系统的目的可能是实现某种技术要求,达到给定的性能、经济与进度指标,象 ATLAS 导弹的目的是完成五千英里的射程,成本指标 40 亿美元,试制时间为十年。但是明确目的并非易事。在许多情况下,似乎已经明确的目的,或口头上的一些说法,往往都经不起推敲。明确系统的目的必须经过严格的论证,并要求提出科学的书面报告。

系统的目的决定着系统的基本作用和功能。系统功能一般是通过同时或顺次完成一系列任务来达到,这样的任务可能有若干个,而这些任务的完成构成了系统及其分系统的功能的完成。这些任务完成的结果就达到系统中间的或最终的目的。

系统的目的一般用更具体的目标来表达,这时系统就具有了总目标,而总目标又划分为若

千分目标。目的性可通过总目标来表达：

$$G = \{g_i | g_i \in G, i = 1 \sim p\} \quad (1-1)$$

式中 G ——系统的总目标；

g_i ——系统的分目标。

当系统的总目标和分目标达到具体化时，我们将得到系统的目标树。

系统分目标集必须保证系统总目标的实现，但是分目标之间可能是矛盾的。比如设计一个生产系统，它的分目标可能有“基建费用最低”，“运行费用最小”，“实现最小可能的安全标准”，“可靠性最大”等等。显然，较低的基建投资费用往往导致较高的运行（经营）费用，较高的安全标准和可靠性指标将使基建和经营费用都增加，但可能使产量和利润也增加。一般地说，系统都有相互矛盾的分目标，因此采取某种形式的折衷是必要的，即在矛盾的分目标之间寻求平衡。为此可通过计算每个分目标对总目标的贡献来确定最佳的妥协是什么，它包括哪些内容，并在系统的预研阶段就进行详细的调查。

2. 集合性 集合是数学名词，即把具有某种属性的一些对象看做一个整体便形成一个集合。集合里的各个对象叫做集合的要素（元素）。系统的集合性是说，系统起码是由两个或两个以上的可以相互区别的要素所组成。要素可以是实体的，如人、设备、仪表、工具等，也可以是非实体的（概念的），如文件、程序、计划、制度等。系统的集合性用数学式可表达为：

$$X = \{x_i | x_i \in X, i = 1 \sim n, n \geq 2, i \neq j\} \quad (1-2)$$

式中 X ——集合；

x_i ——集合的组成要素或组成单元。

比如，一个最简单的制造系统的集合可表达为：

简单的制造系统 $X = \{\text{工作机 } x_1, \text{操作者 } x_2, \text{工具 } x_3, \text{材料 } x_4, \text{图纸 } x_5, \text{工艺卡 } x_6\}$

或者

$$X = \{x_i | x_i \in X, i = 1 \sim 6\}$$

显然，此时系统的要素 $n > 2$ ，而这些要素是相互区别的。

同时，工作机、操作者、工具、材料是实体要素，而图纸和工艺卡则是非实体要素。

再看一个化工厂的例子。化工厂通常包含大量的各种类型的设备、各种原料备品、中间产品、制成品和水蒸汽及电力等劳务。为使工厂正常工作，还需要配备厂长、若干工长和流程工人，还必须安排各类技术业务人员，如化学工程师、会计师、推销员等。上述设备、产品和中间产品、各类人员就是化工厂系统的要素，即化工厂是这些要素所组成的集合。

3. 相关性 系统的组成要素是相互作用、相互依存又相互制约的。集合性确定系统的组成要素，相关性则说明这些要素之间的关系。只有组成要素而要素之间没有相关关系，还不能构成系统。系统的相关性是系统要素之间全部关系的总和，这种相关性是实现系统目的所必需的。这里以二元关系作为相关性讨论的基础，因为任何多元关系都是从二元关系基础上发展的。设 $x_i \in X_i \subset X$ ，而 $x_j \in X_j \subset X$ ，则其相关关系 R 可表示为^[2]：

$$x_i R x_j, \quad x_j R x_i$$

或

$$x_i R(x_j); \quad x_j R(x_i) \quad (1-3)$$

具有这种关系的 x_i, x_j 顺序对是系统相关性的认识对象。这意味着要研究和确定 x_i 和 x_j 的对应关系。这种对应称做映象。如果对应于任一 x_i 总有一个 x_j 存在，反之有一个 x_j 也有确定的 x_i 存在，这时 x_j 是 x_i 的映象， x_i 是 x_j 的原象。 X_i 是 x_i 原象集， X_j 是 x_j 映象集，这种 R 关系就是 X_i 和 X_j 顺序对关系：