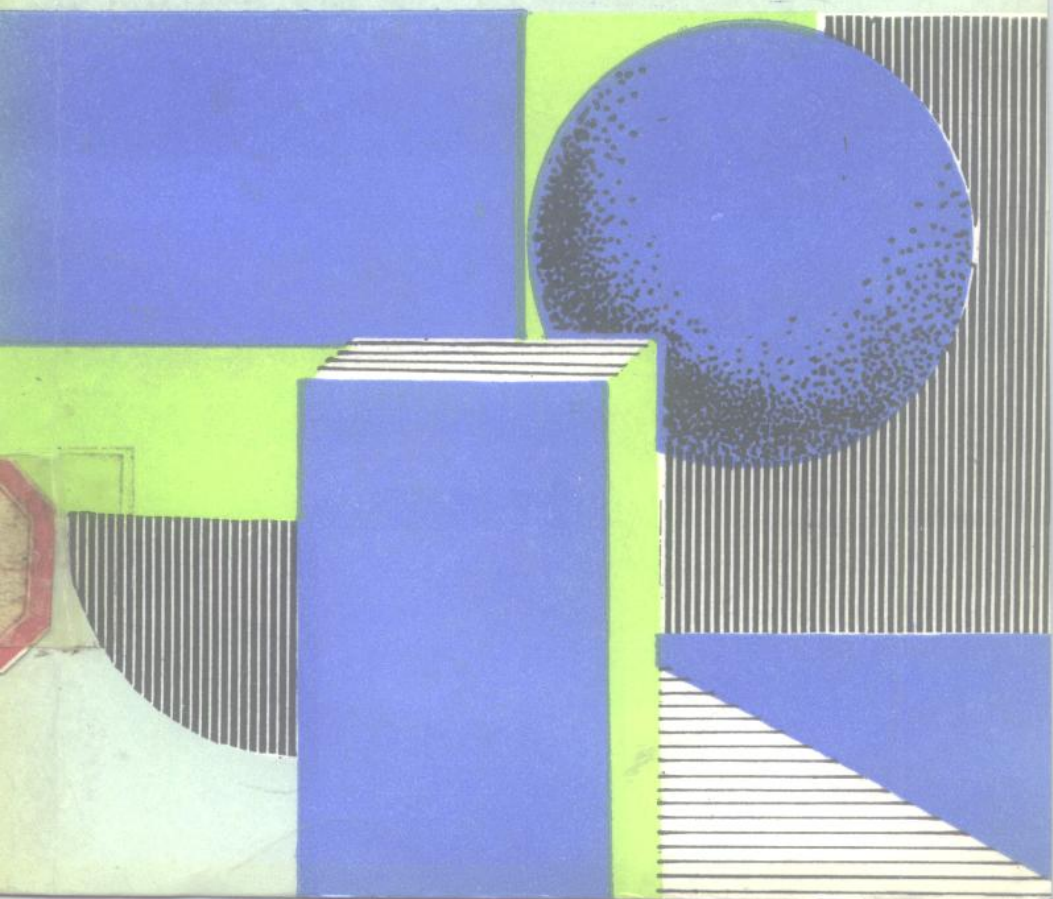


高等学校教材

系统工程理论 方法与应用

汪应洛 主编

高等教育出版社



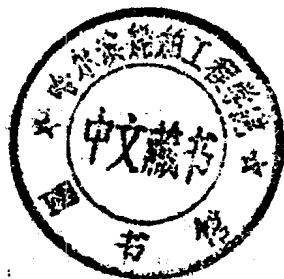
N94

W46-4

356796

系统工程理论、方法与应用

汪应洛 主编



高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 提 要

本书首先论述了系统工程的基本概念和理论基础，以及系统工程的方法论；然后着重介绍了各种系统方法，包括结构模型化技术、分析模型、系统仿真、系统评价、决策分析；接着介绍了战略研究的意义、内容和方法论；最后阐述了系统工程的应用，并提供了 5 个应用实例。

本书是高等学校管理工程专业教材，也可作为各级管理人员、工程技术人员及企业领导干部的培训教材和自学参考书。

D203.50

系统工程理论、方法与应用

汪应洛 主编

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 11.5 字数 280 000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 0001— 4 240

ISBN 7-04-003855-2/Z·88

定价 4.35 元

前 言

本书是根据国家教委管理工程类专业教材编审委员会确定的教材编写规划编写的。

系统工程是 20 世纪中叶才开始兴起的一门新兴的交叉学科。它是把自然科学和社会科学中某些思想、理论和方法等,根据系统总体协调的需要,有机地联系而成的一门新兴的交叉学科。当前,由于科学技术的进步,以及现代管理科学的迅速发展,作为高等学校管理工程类有关专业的学生,需要从系统总体出发来分析和处理问题,亟需具备系统工程的有关知识。本书就是为这一目的而编写的一本教材。

本书共分九章。第一章主要阐述系统和系统的概念,以及系统工程的基础理论等;第二章介绍系统工程方法论的框架、步骤等内容;第三章介绍结构模型化技术,着重介绍了解释结构模型(ISM)及其应用;第四章介绍了分析模型概念以及各种建模方法等;第五章系统仿真技术,着重介绍了系统动力学仿真;第六章主要介绍了系统评价步骤、评价理论以及若干常用的系统评价方法;第七章介绍了决策分析的基本理论和方法;第八章介绍了战略研究的意义、内容和方法论;最后,在第九章中列举了系统工程在 14 个方面的应用,并具体介绍了五个应用实例。

参加本书编写的有:汪应洛(第一、八、九章)、李怀祖(第二、四、七章)、陶谦坎(第三、五、六章)。汪应洛担任主编。

本书由哈尔滨工业大学管理学院博士生指导教师黄梯云教授主审。参加审稿会的有黄洁钢教授、李一智教授、黎志成教授,还有白庆华副教授参加了审稿会。

本书为高等学校管理工程类专业的教材,也可作为各级管理人员、工程技术人员及企业领导干部的培训教材和自学参考书。

系统工程是一门尚在不断发展的交叉学科，涉及的知识面非常广泛。因此，本书内容虽在近十年的教学实践中努力地加以更新、充实和提高，但限于我们的水平，书中不妥和错误之处仍在所难免，恳请广大读者批评指正！

编 者

目 录

前言	1
第一章 系统与系统工程	1
§ 1-1 系统的概念	1
§ 1-2 系统工程是一门新兴的交叉学科	5
第二章 系统工程方法论	21
§ 2-1 系统工程方法论框架	21
§ 2-2 阐明问题阶段	23
§ 2-3 谋划备选方案	32
§ 2-4 建模和预计后果	34
§ 2-5 预测未来环境	39
§ 2-6 评比备选方案	42
§ 2-7 系统工程分析报告	45
第三章 结构模型化技术	47
§ 3-1 引言	47
§ 3-2 图的基本概念及其矩阵表示法	50
§ 3-3 解释结构模型法	56
§ 3-4 解释结构模型的应用	73
第四章 分析模型	87
§ 4-1 模型的概念	87
§ 4-2 矩阵、文氏图、树形图、卡氏图	90
§ 4-3 权重有向图	93
§ 4-4 图解法	102
§ 4-5 拟合法	112
§ 4-6 经验法	120
§ 4-7 机理法	124
§ 4-8 优化技术	131
第五章 系统仿真技术	137

§ 5-1	系统仿真的基本概念及其实质	137
§ 5-2	蒙特卡罗法	140
§ 5-3	随机服务系统的数字机仿真技术	152
§ 5-4	系统动力学	160
第六章	系统评价	188
§ 6-1	引言	188
§ 6-2	系统评价的步骤及其内容	191
§ 6-3	系统评价的理论和方法	196
§ 6-4	费用-效益分析	202
§ 6-5	关联矩阵法	210
§ 6-6	关联树法	217
§ 6-7	层次分析法	224
§ 6-8	模糊评价法	237
第七章	决策分析	245
§ 7-1	概述	245
§ 7-2	效用值概念	249
§ 7-3	效用值函数的推导	254
§ 7-4	决策树	264
§ 7-5	信息价值分析	281
第八章	战略研究	288
§ 8-1	战略的概念及战略研究的意义	288
§ 8-2	战略研究的内容	292
§ 8-3	战略研究方法论	296
第九章	系统工程的应用	315
实例一	多产品经营规划研究	317
实例二	国家宏观经济最优控制模型	322
实例三	勉县人口经济协调发展规划	331
实例四	海安县畜牧业规划模型	343
实例五	微机生产计划、统计管理信息系统的设计	349
参考文献		359

第一章 系统与系统工程

§ 1-1 系统的概念

半个多世纪以来，“系统”作为一个研究对象，在国际上引起了很多学者的注意。“系统”吸引了众多领域的专家从事研究和应用，并逐步形成了一门新兴的学科体系。

系统这一概念来源于人类长期的社会实践。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，科学的发展也不例外。在古代，自然科学界往往把世界看成一个整体，寻求共性和统一，但由于缺乏观测和实验手段，科学技术理论又很贫乏，所以对很多事物只能看到一些轮廓及表面现象，往往是只见森林，不见树木。随着科学技术的发展，理论丰富了，工具更先进了，认识逐步深化了，但仍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而不能纵观整体，以致只见树木而不见森林。只有当认识不断深化，在对个体，对局部有了更多、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各种科学门类之间进行更多的相互联系和相互渗透。这是在更深刻地分析的基础上向更高一级综合发展的新阶段，这种趋势的表现之一就是出现了许多交叉学科和边缘学科。系统科学就是在这种背景下产生的一门新兴交叉学科。

朴素的系统概念，在古代的哲学思想中就有所反映。古希腊的唯物主义哲学家德谟克利特(Democritus, 约公元前467~370年)就曾论述过“宇宙大系统”，他在物质构造的原子论基础上，认为原子组成万物，形成不同系统层次的世界。古希腊的著名学者

亚里士多德(Aristoteles, 公元前 384~322年)关于事物的整体性、目的性、组织性的观点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。我国春秋末期思想家老子就曾阐明自然界的统一性,用自发的系统概念观察自然现象。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系统来研究,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。如在西周时代,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。在东汉时期,张衡提出了“浑天说”。现代耗散结构理论的创始人 I. 普利高津(I. Prigogine)在《存在到演化》一文中指出:“中国传统的学术思想是着重于研究整体性和自发性,研究协调和协和。”但是,当时都缺乏对这一整体各个细节的认识能力,正如恩格斯在《自然辩证法》中指出:“在希腊人那里——正因为他们还没有进步到对自然界的解剖、分析——自然界还被当作一个整体而从总的方面来观察。自然现象的总联系还没有在细节方面得到证明”。^①直到 15 世纪下半叶,近代科学开始兴起,近代自然科学发展了研究自然界的分析方法,包括实验、解剖和观察,才把自然界的细节,从总的自然联系中抽出来,分门别类地加以研究。这就是哲学史上出现的形而上学的思维方法。19 世纪上半叶,自然科学取得了巨大的成就,特别是能量转化和细胞的发现及进化论的建立,使人类对自然过程的相互联系的认识有了很大的提高。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。这也就是系统概念的实质。当然,现代科学技术对于系统思想的发展是有重大贡献的。系统思想是进

① 《马克思恩格斯选集》第三卷,人民出版社,1972年,第468页

行分析和综合的辩证思维工具，它在辩证唯物主义那里吸取了丰富的哲学思想，在运筹学、控制论、各门工程学和社会科学那里获得定性与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。

一、系统的定义

系统(systems)是具有特定功能的、相互间具有有机联系的许多要素(element)所构成的一个整体。在美国的韦氏(Webster)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综合，由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合，等等”。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”。一般系统论的创始人L. V. 贝塔朗菲(L. V. Bertalanffy)把“系统”定义为“相互作用的诸要素的集合体”。美国著名学者阿柯夫(Ackoff R.L.)认为，系统是由两个或两个以上相互联系的任何种类的要素所构成的集合。

综上所述，一个形成系统的诸要素的集合永远具有一定的特性，或者表现一定的行为，而这些特性或行为是它的任何一个部分都不具备的。一个系统是一个由许多要素所构成的整体，但从系统功能来看，它又是一个不可分割的整体，如果硬把一个系统分割开来，那么它将失去其原来的性质。在物质世界中，一个系统中的任何部分可以被看为一个子系统，而每一个系统又可以成为一个更大规模系统中的一个部分。这是一个分析与综合有机结合的思想方法。

二、系统的特性

一般系统都具有下述特性：

1. 集合性。集合的概念就是把具有某种属性的一些对象看做一个整体，从而形成一个集合。集合里的各个对象叫做集合的要素。系统的集合性表明，系统是由两个或两个以上的可以互相

区别的要素所组成的。例如,一个计算机系统,一般都是由中央处理机(CPU)、存储器、输入与输出设备等硬件所组成,同时,还包含有操作系统、程序设计、数据库等软件,而形成完整的集合。

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。

3. 阶层性。系统作为一个相互作用的诸要素的总体,它可以分解为一系列的子系统,并存在一定的层次结构,这是系统空间结构的特定形式。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关系。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。

4. 整体性。系统是由两个或两个以上的可以相互区别的要素,按照作为系统所应具有的综合整体性而构成的。系统整体性说明,具有独立功能的系统要素以及要素间的相互关系(相关性、阶层性)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,要素间的联系和作用也不能脱离整体的协调去考虑。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使你得出有关整体的结论。系统的构成要素和要素的机能、要素的相互联系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。在一个系统整体中,即使每个要素并不都很完善,但它们也可以协调、综合成为具有良好功能的系统;反之,即使每个要素都是良好的,但作为整体却不具备某种良好的功能,也就不能称之为完善的系统。

5. 目的性。通常系统都具有某种目的,要达到既定的目的,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。系统的目的般用更具体的目标来体现,一般说来,比较复杂的系统都具有不止一个的目标,因此需要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、利润和规定的质量指标完成情况。在指标体系中,各个指标之间有时是相互矛盾的,有时是互为消长的。为此,要从整体出发力求获得全局最优的经营效果,要在矛盾的目标之间做好协调工作,寻求平衡或折衷方案。

为了实现系统的目的,系统必须具有控制、调节和管理的功能,管理的过程也就是系统的有序化过程,使它进入与系统目的相适应的状态。

6. 环境适应性。任何一个系统都存在于一定的物质环境之中,因此,它必然也要与外界环境产生物质的、能量的和信息的交换,外界环境的变化必然会引起系统内部各要素之间的变化。系统必须适应外部环境的变化。不能适应外部环境变化的系统是没有生命力的,而能够经常与外部环境保持最优适应状态的系统,才是理想的系统。例如,任何一个工业企业都必须经常了解同类型企业的经营动向、有关行业的发展状态、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,以适应环境的变化。

§ 1-2 系统工程是一门新兴的交叉学科

用系统思想与定量和定性相结合的系统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。

一、在科学技术的体系结构中,系统工程属于工程技术

由于系统工程是一门新兴的交叉学科,尚处于发展阶段,还不够成熟,至今还没有统一的定义。现例举国内外知名学者对系统

工程所作的解释,为我们认识“系统工程”提供线索和参考。

1. 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,是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。”“系统工程是一门组织管理的技术。”^①

2. 美国著名学者H. 切斯纳(H. Chestnut)指出:“系统工程认为虽然每个系统都是由许多不同的特殊功能部分所组成,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。”^②

3. 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、信息流动和控制机制等进行分析与设计的技术。”

4. 日本学者三浦武雄指出:“系统工程与其它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,而系统不仅涉及到工程学的领域,还涉及到社会、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上把它们组织起来,这种横向技术就是系统工程。换句话说,系统工程就是研究系统所需的思想、技术、方法和理论等体系化的总称。”^③

由于学术界往往把系统分析作为系统工程的同义词来解释,我们例举几个国家的大百科全书对系统分析的解释作为参考。

① 钱学森、许国志、王寿云:“组织管理的技术——系统工程”,文汇报,1978年9月27日

② Chestnut, *Systems Engineering Tools*, 1965年

③ 秋山穰、西川智登:システム工学,1977

《美国大百科全书》指出，系统分析是研究相互影响的因素的组成和运用情况。这些因素及其相互的影响完全可能是抽象的，如使用数学方法，也可能是具体的，如运输系统、工业生产系统等。系统分析显著的特点是完整的而不是零星地处理问题，这就要求人们考虑各种主要的变化因素及其相互的影响。运用这种方法常常可以更好地、全面地解决问题。因此，系统分析的意思就是用科学的和数学的方法对系统进行研究和应用。

美国《麦氏科技大百科全书》指出：系统分析是运用数学方法研究系统的一种方法。系统分析的概念是对研究对象(系统)建立一种数学模型，按照这种模型进行数学分析，然后将分析的结果运用于原来的系统。

日本《世界大百科年鉴》指出：系统通常是指作用于一个共同目的的两个或两个以上要素的集合体，但它并不是单纯几个要素的集合，而是从输入到输出的整个过程。系统分析是人们为了从系统的概念上认识社会现象，解决诸如环境问题、城市问题等复杂问题而提出的从确定目标到设计手段的一整套方法。系统分析的用处是：通过明确一切和问题有关的要素同实现目标之间的关系，提供完整的资料，以便决策者选择最合理的解决方案。

由于复杂的大系统受到复杂的社会、经济和技术因素的影响，因此，在进行系统分析的过程中就必然夹杂着决策者个人的价值观和对未来变化不定的主观臆断和理性判断。这样，从方法论上看，系统分析不仅需要计算，还需要依据直观和经验进行判断。从这种意义来说，系统分析的方法既具有科学性，又具有某种艺术性。

综上所述，系统工程是以研究大规模复杂系统为对象的一门交叉学科。它是把自然科学和社会科学的某些思想、理论、方法、策略和手段等根据总体协调的需要，有机地联系起来，把人们的生产、科研或经济活动有效地组织起来，应用定量分析和定性分析相

结合的方法和电子计算机等技术工具,对系统的构成要素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析、设计、制造和服务,从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目的,以便最充分地发挥人力、物力的潜力,通过各种组织管理技术,使局部和整体之间的关系协调配合,以实现系统的综合最优化。

系统工程是一门工程技术,但它与机械工程、电子工程、水利工程等其它工程学的某些性质不尽相同。上述各门工程学都有其特定的工程物质对象,而系统工程则不然,任何一种物质系统都能成为它的研究对象,而且还不只限于物质系统,它可以包括自然系统、社会经济系统、经营管理系统、军事指挥系统等等。由于系统工程处理的对象主要是信息,在国外有些学者认为系统工程是一门“软科学”。

系统工程在自然科学与社会科学之间架设了一座沟通的桥梁。现代数学方法和计算机技术,通过系统工程,为社会科学研究增加了极为有用的定量方法、模型方法、模拟实验方法和优化方法。系统工程为从事自然科学的工程技术人员和从事社会科学的研究人员的相互合作开辟了广阔的道路。

我国著名科学家钱学森提出了一个清晰的现代科学技术的体系结构,认为从应用实践到基础理论,现代科学技术可以分为四个层次:首先是工程技术这一层次,然后是直接为工程技术提供理论基础的技术科学这一层次,再就是基础科学这一层次,最后通过进一步综合、提炼达到最高概括的马克思主义哲学。在此基础上他又进一步提出了一个系统科学的体系结构。他认为系统科学是由系统工程这类工程技术,系统工程的理论方法(像运筹学、大系统理论等)这一类技术科学(统称为系统学),以及它们的理论基础即系统科学所组成的一类新兴科学。

二、系统工程的理论基础

人类的历史,是一个由必然王国向自由王国不断发展的历史。

社会劳动的规模日趋扩大,社会经济活动日趋复杂,使人们对统筹兼顾、全面规划、战略观念等原则从朴素的、自发的应用,提高到科学的、自觉的应用,把它们从经验提高到科学理论。系统工程的理论基础是由一般系统论、大系统理论、经济控制论、运筹学等学科相互渗透、交叉发展而形成的。

1. 一般系统论(general systems theory)。一般系统论是通过对各种不同系统进行科学理论研究而形成的关于适用于一切种类系统的学说。其主要创始人是美国理论生物学家 L. V. 贝塔朗菲。他把一般系统论的研究内容概括为关于系统的科学、数学系统论、系统技术、系统哲学等。由于以往对系统的研究属于哲学观念的范围,未能成为科学,因而贝塔朗菲在创立一般系统论时强调它的科学性,指出一般系统论属于逻辑学和数学的领域,它的任务是确立适用于“系统”的一般原则。

从哲学的系统概念发展成为一般系统论学科,是 20 世纪才实现的。贝塔朗菲在 20 世纪 20 年代研究生物学时,提出了机体系统论的概念,后来他把“机体”这个术语改为“有组织的实体”,用于解释社会现象和工程设施等事物时,逐步形成了系统论的纲领。1945 年后,贝塔朗菲公开发表文章介绍一般系统论的基本原理。1954 年美国成立了“一般系统学会”,1968 年贝塔朗菲在《一般系统论的基础、发展和应用》一书中,把系统作为科学研究的对象,系统、全面地阐述了动态的开放系统的理论。书中指出了当代系统研究已出现了进一步普遍化倾向,不仅在生物学中,而且在行为科学和社会科学中,很多现象已能应用数学表达式和模型来进行描述,不同领域的系统在结构上的类似性是明显的;而有关秩序、组织、整体性、目的性等重要问题,就是一般系统论的基本观念。20 世纪 60 年代以后,除了贝塔朗菲以生物学作为一般系统论的生长点外,以维纳为代表的学者创立了控制论,形成了许多与一般系统论相似的观点,同时工程系统分析也得到了迅速的发展。

比利时著名学者 I. 普利高津发现一切事物都是与外界环境不断交换物质和能量的开放系统。这种开放系统在远离平衡态的情况下,由于非线性的复杂因素而出现涨落,当发生某些特殊事物耦合,达到一定的阈值时,会突然出现以新的方式组织起来的现象,产生新的质变,从原来混沌无序的混乱状态,转变为在时空上或功能上的有序状态。普利高津把这种关于在远离平衡态情况下所形成的新的、稳定的有序结构的理论命名为“耗散结构理论”,并于1969年首次提出耗散结构理论的论文《结构、耗散和生命》。他不仅发展了经典热力学与统计物理学,而且还推进了理论生物学,为贝塔朗菲的“一般系统论”的有序结构稳定性提供了严密的理论根据。1973年以后,联邦德国的赫尔曼·哈肯发现了不同系统之间共同存在着同一系统的要素之间的协同现象而创立了协同论 (synergetics), 他的发现已超出非平衡统计物理学的研究而有更普遍的意义。它研究系统从无序到有序转变的规律和特征,既适用于非平衡系统中发生的有序结构或功能的形成,又包括平衡态中发生的相变过程。由于协同学不受一些热力学概念的束缚,一开始就得到了广泛的应用。对有关的自然科学问题,协同学一般能给出定量结果,对有关的社会科学问题,它也能在科学分析的基础上给予定性说明。协同学在发展进程中推动着系统工程的发展。20世纪下半叶,一般系统论对管理科学的发展有深刻的影响,现代管理科学愈来愈重视管理中的组织联系方面的因素,并开始强调“系统管理”的观念。系统工程的发展正是为组织管理“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用提供一种科学方法。系统工程所取得的积极效果,又为进一步地发展一般系统论开辟了广泛的应用领域。

2. 大系统理论 (large scale systems theory)。大规模复杂系统一般是规模庞大、结构复杂、环节数量大或层次较多,其间关系错综复杂,影响因素众多,并常带有随机性质的系统,如经济计划管理系统、信息分级处理系统、区域经济开发系统等。大系统的