面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

系统工程理论、方法与应用

第二版

汪应洛　主编

高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内 容 提 要

本书是教育部“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果。根据系统工程的学科发展和教学实践，作者对第一版进行了认真科学的修订。全书保留了原来的结构：系统工程的理论基础和方法论、各种系统方法（结构模型化技术、分析模型、系统仿真、系统评价和决策分析等）以及系统工程的应用。第二版的主要改动有：根据学科的发展和教学的需要，改写和充实了大部分章节的内容，更新了模型的案例，并增加了计算机的运用。本书可供管理类、工程类专业师生使用，也可供管理人员、技术人员参考。

本书第一版获国家教委优秀教材一等奖。

目　录

第二版前言

第一版前言

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 …… 4

第二章　系统工程方法论 …… 15

§2－1　系统工程方法论框架 …… 15

§2－2　阐明问题阶段 …… 16

§2－3　谋划备选方案 …… 22

§2－4　建模和预计后果 …… 23

§2－5　预测未来环境 …… 27

§2－6　评比备选方案 …… 29

§2－7　系统工程分析报告 …… 31

第三章　结构模型化技术 …… 33

§3－1　引言 …… 33

§3－2　解释结构模型法 …… 35

§3－3　解释结构模型的应用 …… 50

第四章　分析模型 …… 58

§4－1　模型的概念 …… 58

§4－2　矩阵、文氏图、树形图、卡氏图 …… 61

§4－3　权重有向图 …… 63

§4－4　图解法 …… 68

§4－5　拟合法 …… 72

§4－6　经验法 …… 76

§4－7　机理法 …… 79

§4－8　优化技术 …… 83

§4－9　状态空间模型 …… 87

第五章　系统仿真 …… 95

§5－1　系统仿真概述 …… 95

§5－2　离散事件系统仿真 …… 99

§5－3　仿真数据的分析 …… 117

§5－4　系统动力学 …… 125

第六章　系统评价 …… 144

§6-1 系统评价概述 …… 144
§6-2 系统评价的步骤及构成 …… 146
§6-3 系统评价的理论和方法 …… 149
§6-4 费用—效益分析 …… 154
§6-5 关联矩阵法 …… 160
§6-6 PATTERN(关联树)法 …… 163
§6-7 可能—满意度法 …… 167
§6-8 层次分析法 …… 170
§6-9 模糊评价法 …… 174
第七章 决策分析 …… 177
§7-1 概述 …… 177
§7-2 效用值概念 …… 179
§7-3 效用值函数的推导 …… 183
§7-4 决策树 …… 190
§7-5 信息价值分析 …… 203
§7-6 决策支持系统 …… 207
§7-7 冲突分析 …… 218
第八章 战略研究 …… 225
§8-1 战略的概念及战略研究的意义 …… 225
§8-2 战略研究的内容 …… 228
§8-3 战略研究方法论 …… 231
第九章 系统工程的应用 …… 248
案例一 人工神经网络在企业战略制订中的运用 …… 251
案例二 A市开发区社会保险系统分析及建模 …… 259
案例三 A药厂产品、技术与形象发展战略研究 …… 269
案例四 灰石水坝冲突 …… 277
案例五 微机生产计划、统计管理信息系统的设计 …… 288
参考文献 …… 296

第二版前言

本书系1992年出版的高等学校教材《系统工程理论、方法与应用》的第二版，是高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革项目“经济管理系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”的成果之一。

经过多年来的教学实践，我们积累了大量宝贵的教学经验和社会实践资料。特别是当代科学技术突飞猛进，世界经济迅速发展，推动了系统工程学科的蓬勃发展，人们从社会实践中，深化了对系统的认识。对于开放的复杂巨系统，只有把人的认识，从定性到定量综合集成起来，才能形成认识和改造复杂巨系统的方法论。邓小平理论明确指出我国还处于社会主义初级阶段，正处于经济转轨时期，必须努力建设具有中国特色的社会主义市场经济体系。系统工程作为交叉学科，将在“科教兴国”战略指引下，发挥更大的作用。为此，有必要对本书第一版的内容进行充实和修订。

本书仍分九章。第一章阐述系统和系统工程的概念，介绍系统工程的基础理论；第二章介绍系统工程方法论的框架、步骤等内容；第三章阐述结构模型化技术，着重介绍解释结构模型(ISM)及其应用；第四章阐述分析模型概念以及多种行之有效的建模方法；第五章加强了现代仿真技术理论和方法的论述，着重介绍系统动力学的理论、方法和应用实例；第六章阐述系统评价的重要意义、系统评价理论及方法和步骤，介绍几种常用的系统评价方法；第七章论述决策分析的基本理论和决策方法，增加了现代决策支持系统的理论、方法及其发展远景等内容；第八章阐述战略研究的意义、内容和方法，强调战略实施和战略管理的重要性，增加介绍了现代企业柔性战略的制订；第九章列举了系统工程在14个领域的应用，并结合近年来科研和生产实践，具体介绍了应用案例，以帮助读者应用系统工程的理论、方法去解决实际问题。

参加本书第二版修订的有汪应洛教授、李怀祖教授、孙林岩教授、宣慧玉教授、汪慕红教授(加拿大)、张鹏翥副教授。

本书为高等学校管理科学与工程类专业的本科生教材，也可作为相关专业研究生的教学参考书，并可作为各级管理人员、工程技术人员、企业领导干部和广大企业家的参考书。

系统工程是一门尚在蓬勃发展中的新兴交叉学科，涉及的知识面非常广泛，应用领域众多。本书内容虽在多年的教学实践和科学研究中努力加以更新、充实和提高，但限于编者的水平，书中不妥和错漏之处仍在所难免，恳请广大读者批评指正。

汪应洛

1997.7

第一版前言

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工程的概念，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中的交叉学科，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

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综观整体，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学科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～前 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～前 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综合体”。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

① 《马克思恩格斯选集》第三卷，人民出版社，1972 年，第 468 页

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，从而形成一个完整的集合。

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。系统的目的一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，而且更重要的是要考核它的利润、成本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

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, *Sytems Engineering Tools*, 1965

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。"①

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。

《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

① 秋山穰、西川智登：システム工学，1977

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,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概念。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仿的观点,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。大系统的输入、输出、反馈、信息转换和传递等,与一般的工程控制系统有类似之处,又有其特定的规律性。研究大系统的结构方案、稳定性、最优化、建立模型的模型简化等问题称为大系统理论。

1) 大系统结构方案。大系统结构方案一般分为递阶控制方案和分散控制

方案。

递阶控制。“递阶”表示层次、等级的意思，递阶控制是在层次结构的系统中，将控制单元分成若干等级。最上层的叫做协调器；以下各级称为各层次的决策单元，它们可以是一个作用于局部的微型计算机，也可以是一个不同层次的决策者；最下一层的称为第一级决策单元，它们直按控制着基层的各个子系统。递阶控制的特点是，下级决策单元只接受上一级决策单元的命令，上一级决策单元不逾越下级决策单元而介入被控大系统，最上层的协调器则负责协调控制整个大系统(通过各层次的决策者)。整个递阶系统有一个总的目标，各决策单元和谐地工作，以实现目标的优化。递阶控制可由两种控制方式实现：

① 多层控制。根据控制任务或策略的分解来分层，各层是在不同长度的时间段内进行工作的。愈到上层，时间段愈长，所考虑的问题愈原则化(见图 1－1)。多层控制常用于工业或其它组织中的生产安排和管理。图 1－1 中第一层是直接控制层，根据上层的决策直接控制大系统的过程或状态，补偿频率高、变化快的扰动。第二层是最优化层，根据上层给定的品质指标和约束条件、系统的数学模型，通过制定直接控制的策略，并设置其给定值，实现大系统的最优控制，补偿次高频的、变化较快的扰动，如负荷变化等。第三层是自适应层，根据由市场供销情况所决定的生产计划，来补偿由于元件老化、机器磨损、环境变化等缓慢扰动的影响，校正大系统的最优运行。

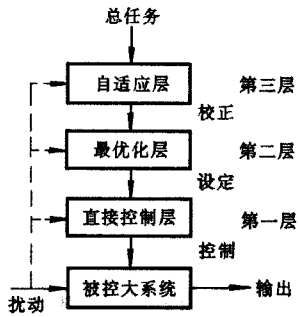


图 1－1　多层控制示意图

②多级控制。将总目标分解成局部目标，并且利用各级局部决策单元和协调器进行控制和协调。图 1－2 所示是二级递阶控制结构，也可以采用更多级的

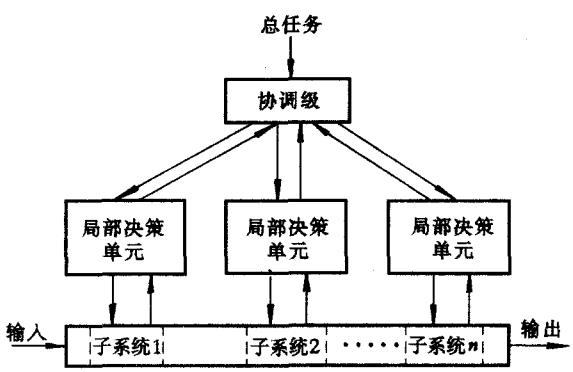


图 1－2　多级控制示意图

层次结构。这时递阶结构呈金字塔型。多级控制常用于经济管理组织机构(如工厂的管理机构)。下级机构将劳动力组织到各生产岗位,上级机构指挥与协调各下级机构的工作。每一级都力求有效地管理下一级,同时又在其上一级的指挥下工作,以保证整个组织机构高效率地工作,并完成总任务。

分散控制。大系统的分散控制结构可用图 1-3 表示。它可看作二级递阶控制的一种特殊情况,其中协调器和子系统间的联系被切断,代之以各子系统间的信息联系。换言之,它通过只具有局部信息的各子系统局部控制器进行局部控制,来完成大系统的优化任务。这可以减少集中控制(总体优化)或递阶控制时在信息传输方面的技术困难和设备费用,但一般只能得到一个次优解。

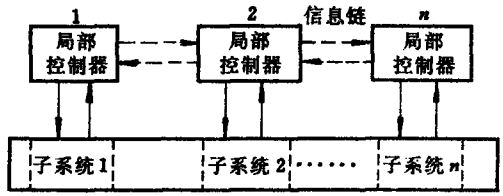


图 1-3 分散控制示意图

2) 大系统的稳定性。对于多级递阶控制系统的稳定性,主要研究如果各子系统稳定,则其相互关联满足什么条件时,大系统也是稳定的,通常采用向量李雅普诺夫函数法和输入—输出法进行稳定性分析。

对于分散控制系统的稳定性,主要研究利用各子系统的输出,加以反馈至各局部控制器,并寻找相应的控制规律,来保证整个大系统的稳定。

3) 大系统优化。大系统优化分为静态优化和动态优化。大规模复杂系统要达到最好的目标,就是所谓大系统优化。由于大系统的规模庞大、结构复杂,影响优化目标的因素众多,因此在优化方法中往往由于维数过高、约束太多,而使计算工作量过大,甚至使用大容量、高速计算机也难于胜任。例如,遇到一个具有 10^4 个方程和 10^6 个决策变量的大线性规划用以解决一个大系统的优化问题时,其计算工作量是惊人的。人们统称之为"维数灾难"。为摆脱"维数灾难",则可以巧妙地把大的问题化成许多小的问题,以便于求解。这是大系统优化的一个主要研究内容

分解与协调的方法是大系统优化的基本方法。由于大系统的总目标和各个子系统的目标未必一致,或者说,往往是有矛盾的,所以不能仅仅将大系统简单地分解成若干子系统,而后对各子系统分别优化,最后加起来求得总目标的优化。而必须采用特定的分解与协调方法,即把可分的大系统分解成许多互不相关的子系统,但这些互不相关的子系统又都是与大系统有关的,各子系统将性能反馈给大系统,用总目标衡量后,再将指示下达给各个子系统,这就是大系统分

解与协调的基本思路。

大系统优化又可分为静态优化和动态优化。大系统静态优化一般可采用Dantzig-Wolfe大线性规划方法来解决,即用Dantzig-Wolfe分解原理把原规划分解为一个主规划和许多彼此独立的子规划,各子规划按主规划给定的要求分别进行优化,并把优化解汇报给总规划,主规划用总目标衡量是否为总体最优,若不是最优,就重新给出要求,让各子规划重新进行优化。这就是分解协调原理的应用。

对于大系统动态优化问题,也可以采用分解协调原理,一般可将各子系统之间具有联系约束的动态优化问题,用拉格朗日(Lagrange)乘子向量化为无联系约束的动态优化问题。这些互不相关的子系统,各自具有子目标和相应的状态方程。经过模型协调计算,以求得各子系统分散控制的规律,使大系统达到优化。

4) 大系统的模型简化。为减少计算和简化结构,常需要简化模型。集结(aggregation)法是主要方法之一。这种方法通过一个常量的集结矩阵,以低维的状态空间描述来简化原属高维的系统,并仍保留原系统的主要模式。

3. 经济控制论。经济控制论是应用现代控制论的科学方法分析经济过程的学科。它为合理地控制经济过程提供了新的见解,并提供了一种有效地计划和管理国民经济及其各部门的新工具。从20世纪60年代初期,控制理论开始被经济学家大量引进经济领域。1965年美国哈佛大学的经济学教授R.多贝尔(R.Dobell)和控制论教授何毓琦首次合作利用控制论建立经济学模型。1966年该校经济系的L.泰勒(L.Taylor)和D.肯德里克(D.Kendrick)教授应用控制理论中的共轭梯度法制订南朝鲜经济最优计划模型。1972年由美国国家经济研究局发起,在普林斯顿成立了第一个"随机控制和经济系统研究小组",有邹至庄教授和阿萨恩斯(Athans)教授等40多位经济学家和控制论专家参加。此后,控制理论在微观经济和宏观经济方面都得到广泛的应用。例如美国的密西根宏观经济控制模型是根据计量经济理论,使用反馈控制技术建立起来的大规模非线性随机模型。它用来分析和制订美国的国家经济政策。

出于宏观经济预测和政策分析的需要,东西方的经济学者正把注意力从传统的经济静态优化转移到动态优化上来。把控制变量引进动态优化模型,常能通过现代计算手段直接获得经济决策方案。然而做到这一步的前提是解决计量经济模型的状态空间化。于是,计量经济系统状态空间模型的结构特点、经济意义和获得最优控制解的途径,便成为经济控制论的中心议题。

由于经济系统是相互依存的一个整体,投入—产出模型是一种简单而有用的经济分析工具,是包含许多经济部门、高度解集、确定供给的综合模型。但在实际经济运行中,考虑到收益变化、生产技术变化、生产中的时间滞后、资本积累过程等时间因素引起变量变化,因而人们在静态投入—产出模型的基础上加入

变化因素后，研究动态投入—产出模型，从而形成经济控制论的重要内容。

4. 运筹学(operation research)。它是应用分析、试验、量化的方法，对经济管理系统中人、财、物等有限资源进行统筹安排，为决策者提供有依据的最优方案，以实现最有效地管理。

运筹学往往运用模型化的方法，将一个已确定研究范围的现实问题，按提出的预期目标，将现实问题中的主要因素及各种限制条件之间的因果关系、逻辑关系建立数学模型，通过模型求解来寻求最优方案。运筹学的分支主要有：线性规划、非线性规划、动态规划、排队论、对策论等。

1) 线性规划。在经营管理工作中，往往碰到如何恰当地运转由人员、设备、材料、资金、信息、时间等因素构成的体系，以便最有效地实现预定工作任务的问题。这一类统筹计划问题用数学语言表达出来，就是在一组约束条件下寻求一个目标函数的极值问题。如果约束条件表示为线性方程式，目标函数表示为线性函数时，就叫线性规划。一般线性规划的数学模型为

要求目标函数实现最大化(或最小化)

$$\max(\min)Z=\sum_{j=1} c_j x_j$$

由 m 种有限资源构成的一组约束条件

$$\sum_{j=1} a_{ij}x_j \leqslant (=,\geqslant) b_i, \quad i=1,2,\cdots,m$$

各变量不能取负值，即

$$x_j \geqslant 0, \quad j=1,2,\cdots,n$$

如果在所要考虑的数学规划问题中，目标函数与约束条件是非线性的，就叫非线性规划问题。如果决策变量中要求取值必须满足整数的线性规划问题，就称为整数规划(integer programming)。凡规定决策变量只能取值 0 开 1 的特殊整数规划，就称为 0-1 规划。

2) 动态规划(dynamic programming)。它是将一个复杂的多段决策问题分解为若干相互关联的较易求解的子决策问题，以寻求最优决策序列的方法，如研究水力资源多级分配的优化问题。

3) 排队论(queuing theory)。它研究排队现象的统计规律性，并用以指导服务系统的最优设计和最优经营策略，又称随机服务系统理论。在这种服务系统中，服务对象何时到达和他们占用系统的时间的长短事先都无从确知。这是一种随机聚散现象。它通过对每个个别的随机服务现象统计规律的研究，找出反映这些随机现象平均特性的规律，从而在保证较好经营效益的前提下改进服务系统的工作能力。