

高等学校教材

社会系统工程概论

主 编 杨博文

副主编 李志刚

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

社会系统工程概论

主 编 杨博文
副主编 李志刚

石油工业出版社

内 容 提 要

本书涵盖了系统思想观点、系统思维方法、系统工程技术以及社会系统理论等内容,结合了教学实践与理论研究的丰硕成果。

本书结合了理工科大学的特色和实际,目的是加强社会工作专业和公共管理专业学生的系统思想、系统思维以及系统工程技术技能的培养。

本书适合作为理工科院校社会工作专业和公共管理专业的学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

社会系统工程概论/杨博文主编.

北京:石油工业出版社,2008.5

高等学校教材

ISBN 978-7-5021-6492-8

I. 社…

II. 杨…

III. 社会工作-系统工程-高等学校-教材

IV. C916

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 022283 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523580

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16.25

字数:391 千字

定价:24.50 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究



目 录

第一章 绪论	1
第一节 古今系统思想概述	1
第二节 现代系统科学的形成和发展	4
第三节 系统科学的体系结构和重要地位	16
第二章 系统科学原理	26
第一节 系统	26
第二节 系统原理	38
第三节 系统研究的方法论	48
第三章 自组织系统论	53
第一节 耗散结构理论及自组织的内在机制	53
第二节 协同学理论及自组织系统动力机制	60
第三节 系统的自组织原理	70
第四节 突变理论和超循环理论	73
第四章 复杂系统理论	85
第一节 探索复杂性的混沌理论	85
第二节 分形理论及其认识世界的方法论意义	92
第三节 复杂性分析	96
第五章 系统控制论	103
第一节 系统控制与控制系统	103
第二节 系统控制的基本方法	115
第三节 复杂系统的控制与决策	123
第六章 系统运筹论	134
第一节 系统运筹概述	134
第二节 系统运筹问题与模型	137
第三节 系统运筹的基本方法	140
第七章 系统工程方法技术	145
第一节 系统工程概述	145
第二节 系统工程方法	152
第三节 系统工程工作流程与技术	158
第八章 经典社会系统理论	190
第一节 社会系统理论的先驱	191
第二节 帕森斯的社会系统理论	195
第三节 鲁曼的社会系统理论	203
第九章 现代社会系统理论	215



第一节 社会系统的构成要素及相互关系·····	215
第二节 社会系统的组织方式·····	222
第三节 社会系统自组织进化的动力学机制·····	225
第四节 社会系统的复杂性：混沌与分形·····	234
参考文献·····	251
后记·····	253



第一章 绪 论

第一节 古今系统思想概述

系统科学是一门新兴学科,作为现代科学技术体系中的一大门类,它经历了孕育、形成和发展的漫长过程。人类在长期的社会实践中,逐渐形成了系统概念和系统思想。

一、古代朴素的系统思想

系统思想早在古代就有萌芽。随着人们认识自然和改造自然的程度不断加深,人类社会逐渐产生了各种各样的系统观念和系统意识,经过古代思想家的总结和概括,形成了朴素的系统思想。

(一) 西方古代的朴素系统思想

古希腊哲学家德谟克利特(Democritus,公元前460年~公元前370年)所著的《世界大系统》是最早采用系统(system)一词的书,书中将系统理解为部分组成的整体,指由相互联系、相互作用的要素(部分)组成的具有一定结构和功能的有机整体。古希腊辩证法奠基人之一的赫拉克利特在《论自然界》一书中说:“世界是包括一切的整体”。他把自然界看成一个系统,世界上的万物都是系统的组成要素。

亚里士多德(Aristotle,公元前384年~公元前322年)提出了事物构成的“四因说”。他认为,“质料因”构成事物的基质,“形式因”构成事物的结构,“动力因”构成事物的建造,“目的因”构成事物的缘由,世界万物都是这“四因”运动变化的综合产物。他还深刻地指出,整体虽然由若干部分组成,但整体并非是各部分的机械堆砌,其整体功能可以大于各部分功能之和。这一思想阐明了系统的本质,被后来一般系统论的创始人贝塔朗非推崇为系统思想的最高原则。

(二) 中国古代的朴素系统思想

中国是世界四大文明古国之一,我们祖先的朴素系统思想比西方更注重系统各部分之间、系统与环境之间的相互联系以及系统的协调一致性。西方某些学者认为,中国古代的朴素系统思想是现代系统科学最古老的理论来源之一。

形成于殷商之际的《周易》把世界看成是由天(乾)、地(坤)、雷(震)、火(离)、风(巽)、泽(兑)、水(坎)、山(艮)8种自然成分组成的整体。这8种自然成分就是“八卦”,8种自然成分两两组合共构成64卦,384爻。八卦认为,世界万物是由阴阳的不同组合构成的,阴阳组合之变化导致万物的变化。“八卦”和64卦分别构成一个整体,每一卦又构成一个整体,每卦6爻之间也存在着相互制约的关系。“五行说”把自然界中的金、木、水、火、土5种成分看做是世界的本原,并认为这5种基本要素按照相生相克的



规律,制约着自然界和社会的运动变化。“阴阳说”认为,阴和阳是构成世界万物的本原,如天为阳,地为阴;男为阳,女为阴;背为阳,腹为阴;火为阳,水为阴;外为阳,内为阴;上为阳,下为阴;脏为阳,腑为阴,等等。阴阳既相互对立,又相互联系,而且在一定条件下可以相互转化。“有无说”是道家的中心思想,它集中体现在《老子》(又名《道德经》)一书中。“有无说”认为,世界万物都是有和无的统一,都是有和无相生、有和无转化的过程。“有无说”提出“道(即规律)生一、一生二、二生三、三生万物”,也就是说,道产生于统一而未分化的原初之物,谓之“一”;“一”又生阴阳二气,谓之“二”;“二”又生出天、地、人,谓之“三”;“三”又生出万物。这一思想强调了自然界的统一性和动态变化性。

我国古代的系统思想还反映在军事理论方面。公元前5世纪春秋末期,我国著名军事家孙武在《孙子兵法》中就阐述了不少朴素的系统思想和谋略。《孙子兵法》强调“经五事”,即从道、天、地、将、法5个方面来分析战争的全局,这里所讲的“道”,就是要内修德政,注重战争是否有理,有道之国,有道之兵,能得到人民的支持,这是胜利之本。此外,还有天时、地利的客观条件。而将领的才智、威信状况,士兵是否训练有素,纪律、赏罚是否严明,粮道是否畅通等则是主观条件。孙武还依据“五事”推论出“七计”,指出“经之五事,校之以计,而索其情”。《孙子兵法》是一部揭示战争规律的杰作,对战争系统的各个层次、各个方面以及它们的内在联系都进行了全面分析和论述,从而在整体上形成了对战争的规律性的认识。

在社会实践和生产活动方面,战国时期秦国李冰设计修造的都江堰是系统工程实践的典范,该工程包括“鱼嘴”岷江分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引水工程3大主体工程和120个附属渠堰工程,各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。根据今天的试验,当时对工程的排沙、引水、防洪等方面都作了精确的数量分析,使工程兼有防洪、灌溉、漂木、行舟等多方面的功能。由于渠道上设置了水尺测量水位,合理控制分水流量,工程不仅分导了汹涌湍急的岷江而化害为利,还利用分洪工程有节制地灌溉了14个县的几百万亩田地。工程不仅在施工时期有一套管理办法,还建立了维修保养制度,每年按规定淘沙修堤,使工程经久不衰,至今仍能发挥其效益。都江堰体现了非常完美的整体观念、优化方法和发展思路,即使以今天的观点看,仍不愧为一项宏伟的水利工程,这说明人类在知道系统工程之前,在社会实践中就已经进行辩证的系统思维了,并应用朴素系统思想改造自然和社会。

我国古代“天人合一”的系统思想是古代人民在利用自然和改造自然过程中得出的科学总结,至今仍闪耀着耀眼的光芒。“天人合一”中的“天”即自然环境;“人”即指抽象的、社会的人类。该理论认为,人和天是一个统一整体,两者紧密联系、不可分割、相互感应。这一理论蕴含着人类活动会改变自然环境,改变了的自然环境也会反过来影响人类活动,人类活动一定要遵循自然规律,否则将遭到大自然无情报复的深刻含义。当前世界面临的许多全球性问题,归根结底都是由于人与自然之间的和谐关系被打破造成的,都是违背了“天人合一”的系统思想。所以,我国古代“天人合一”的系统思想对正确理解人与自然的关系具有重要的意义,也是当前可持续发展应遵循的最高原则。



二、近代辩证哲学的系统思想

自15世纪开始,资本主义在西方国家萌生。伴随着欧洲文艺复兴和宗教改革运动,近代科学开始兴起,力学、天文学、物理学、化学、生物学等科目逐渐从混为一体的自然哲学中分离出来,获得日益迅速的发展。朴素的系统思想逐渐被辩证的系统思想所取代。19世纪下半叶,以能量守恒和转化定律、细胞学说和达尔文生物进化论3大发现为代表,世界科学技术进入全面发展时期,这为人们全面认识自然界的整体性和相互联系性提供了有利条件。马克思和恩格斯总结吸收了已有的系统思想的合理成分,根据当时最新科学技术成果,经过科学归纳、概括和思辨,形成了马克思主义唯物辩证系统观。马克思认为,社会是一切关系同时存在而又相互依存的有机整体,社会形态的发展也是一个有机整体,任何一个社会形态都是该有机体演变过程中的某一存在形式。

西方学者也普遍认为,马克思是把系统思想首次运用于社会科学研究的学者。《资本论》第一卷中这样写道:“经济生活呈现出现象,和生物学的其他领域的发展史相类似……对现象所作更深刻证明,各种社会机体像动植物一样,彼此根本不同……由于各种机体的整个结构不同,它们的各个器官有差别,亦即器官借以发挥作用的条件不一样,等等,同一个现象却受完全不同的规律的支配。这种研究的科学价值在于阐明了支配着一定社会机体的产生、生存、发展和死亡以及为另一更高的机体所代替的特殊规律。”^①在《政治经济学批判·导言》中,马克思具体运用系统思想、辩证的系统观剖析了人类社会,剖析了资本主义社会这种“历史上最发达和最复杂的生产组织”。他写到:“我们得到了结论并不是说生产、分配、交换、消费是同一的东西,而是说,它们构成了一个总体的各个环节,一个统一体内的差别。……一定的生产决定一定的消费、分配、交换和这些不同要素相互间的一定关系。……不同的要素之间存在着相互作用。每一个有机整体都是这样。”^②正是用系统观点研究社会,使得马克思有可能揭示了社会发展的客观的、整体的规律,“我所得到的并且一经得到就用于指导我的研究工作的总的结果,可以简要地表述如下:人们在自己生活的社会生活中发生一定的、必然的、不以他们的意志为转移的关系,即同他们的物质生产力的一定发展阶段相适应的生产关系。这些生产关系的总和构成社会的经济结构,即有法律的和政治的上层建筑竖立其上并有一定的社会意识形态与之相适应的现实基础。物质生活的生产方式制约着整个社会生活、政治生活和精神生活的过程。不是人们的意识决定人们的存在,相反,是人们的社会存在决定人们的意识。社会的物质生产力发展到一定阶段,便同它们一直在其中活动的现存生产关系或财产关系(这只是生产关系的法律用语)发生矛盾。于是这些关系便由生产力发展形式变成生产力的桎梏。那时社会革命的时代就到来。随着经济基础的变更,全部庞大的上层建筑也或慢或快地发生变革。”^③从这段充满唯物辩证法和历史唯物论的光辉论述中,不难看出马克思用系统思想和系统观为我们描述的一幅社会静态结构和动态发展结合的系统图景。

① 《马克思恩格斯选集》第2卷。北京:人民出版社,1972年,217页。

② 同上,102页。

③ 同上,82~83,208页。



在恩格斯看来,整个世界是一个有机联系起来的复杂的系统,正是相互联系、相互作用构成了运动,因而这就是一个自发运动、自我组织的复杂系统,而且永远处于运动、变化和发展之中。“物质没有运动是不可想象的。其次,既然我们面前的物质是某种既有的东西,是某种既不能创造也不能消灭的东西,那么运动也就是既不能创造也不能消灭的。只要认识到宇宙是一个体系,是各种物体相互联系的总体,那就不能不得出这个结论来。”^① 恩格斯在所阐述的辩证自然观中充满了丰富的系统思想,实际上系统思想已成为辩证自然观的一个有机组成部分。恩格斯的辩证自然观将自然界描述成一个有机的整体系统,“整个自然界被证明是在永恒的流动和循环中运动。”^② 这一辩证自然观的基本点,用另一种表述就是“世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体。”^③ 对于这个复杂的总体系统,恩格斯认为它存在着一定的层次结构。他写到:“关于物质构造不论采用什么观点,下面这一点是非常肯定的:物质是按照质量的相对大小分成一系列较大的、容易分清的组……可见的恒星系、太阳系、地球上的物体,分子和原子,最后是以太粒子,都各自形成这样一组。”^④

马克思、恩格斯的辩证唯物主义认为,物质世界是由无数相互联系、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。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,也就是系统思想。

第二节 现代系统科学的形成和发展

一、一般系统理论的形成和发展

(一) 19 世纪末至 20 世纪 20 年代若干系统分支理论的产生

19 世纪末或 20 世纪初,人们逐渐认识到,近代科学的发展虽然取得了巨大成就,但是走的是一条分析的道路,学科分化愈来愈细,形成了众多学科分门别类的研究局面,曾严重阻碍着科学的发展。鉴于此,现代科学技术的发展走的是一条综合发展的整体化道路,特别是强调整体研究的若干系统分支理论几乎同时出现在不同的研究领域,如热力学第二定律、波尔兹曼有序性原理、爱因斯坦的相对论和大统一理论、贝塔朗非的生物有机体论、爱尔朗的随机服务问题、泰勒的工厂经营管理问题、波莱尔的策略性竞争问题、列昂捷夫的投入产出问题、兰彻斯特的新武器配套使用问题等,这些理论都强调研究对象的整体性、结构性、动态性和关联性系统问题,并有完善的定量方法。它们的出现为现代系统科学构筑提供了材料。另一方面,从 20 世纪以来,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,第二次世界大战后,雨后春笋般出现一

① 恩格斯《自然辩证法》,54 页。

② 同上,16 页。

③ 《马克思恩格斯选集》第 2 卷。北京:人民出版社,1972 年,240 页。

④ 恩格斯《自然辩证法》,248 页。



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便应运而生了，而且发展十分迅猛。

（二）20 世纪 40 年代到 60 年代系统理论的形成和发展

1. 一般系统论

作为一门科学的系统论，人们公认是美籍奥地利理论生物学家贝塔朗菲创立的。他于 1937 年提出了一般系统论原理，1968 年发表专著《一般系统理论——基础、发展和应用》，正式确立它的学术地位。系统论研究了系统的层次性、整体性、动态性、开闭性以及系统中体现的“关系”和“目标”等，其代表性模型是 $\frac{dQ_i}{dt} = F_i(Q_1, \dots, Q_n)$, $i=1, 2, \dots, n$ ，即以 $Q_1, \dots, Q_n$ 为要素的系统在目标常定下，任一要素的改变都是由所有要素决定的。虽然这些在今天看来还算是初等的，但它最大的贡献在于提出了“系统”这一概念，指出“系统”是最为广泛的、具有深刻本质和规律的、值得专门探讨的客观存在。

贝塔朗菲简介

贝塔朗菲 (von Bertalanffy L. 1901—1972 年)，美籍奥地利理论生物学家，他的母亲有很高的文化修养，在他小的时候就注意对他的培养。在他十几岁时，就专门为他设置了一个家庭实验室做解剖实验，研究动植物组织。他除了热爱生物学外，对哲学还有着浓厚的兴趣，在 20 岁以前就研究过进化论，从拉马克到达尔文、海克尔和毕希纳的著作，从黑格尔到马克思的哲学著作都有过研究。早在 1924—1928 年，贝塔朗菲就多次发表文章表达系统论思想。1932 年出版了《理论生物学》，1934 年出版了《现代发生理论》，提出用数学和模型来研究生物学的方法和机体系统论概念。1937 年经《数学生物之理学》的奠基人拉谢夫斯基 (Iashivski) 的推荐，贝塔朗菲被聘为洛克菲勒基金会的研究员到美国工作。在这一年，他在芝加哥大学由卡利斯 (Carius)、莫里斯 (Morris) 组织的讲习班上第一次宣布了“一般系统论”的基本思想，但系统论思想直到 20 世纪 50 年代以后才被世人认同。贝塔朗菲一生主要从事哲学、生物物理学、癌症以及方法论和一般系统论的研究，著有《理论生物学》(1951 年)、《从分子到有机体的认识》(1949 年)、《生命问题》(1950 年)、《流体平衡的生物物理学》(1963 年)、《一般系统论的基础、发展和应用》(1968 年)。

作为一般系统论之父，贝塔朗菲做出了两个重要贡献：首先划分了开放系统和封闭系统，指出开放系统必须不断与外界进行物质和能量的交换，并同时调整其内部构成以达到动态平衡，因而不能用经典热力学定律来描述；其次是创立一般系统理论，他坚持认为一般系统理论是研究“整体” (wholeness) 的科学。贝塔朗菲的理想是由一般系统理论来统一当时相互分割和孤立的各种学科，他希望一般理论能最终发展成为由数学来表述的，适合于各个学科的超级语言。但是，作为科学家，贝塔朗菲毕竟是清醒的。他当时就指出“系统思想即使不能用数学表达，或始终只是一种指导思想，而不是一种数学构想，也仍然保持其价值”。当代西方系统科学发展的历史表明了贝塔朗菲这种估计的前瞻性。

2. 运筹学

运筹学 (operations research) 是在二次世界大战中形成的一种系统优化理论，包括规



划论、排队论、存储论、图论和系统分析（决策论）等，如规划论即表现为数学模型的解理论，其中 $u(x)$ 为目标函数， $g(x)$ 为约束函数。规划论模型有线性和非线性、单目标和多目标之分。

$$\begin{cases} u(x) \longrightarrow \min(\text{or } \max) \\ \text{s. t. } : g(x) \leq B \end{cases}$$

运筹学是运用科学的数量方法（主要是数学模型）研究对人力、物力进行合理筹划与运用，寻找管理及决策最优化的综合性学科。从运筹学成为一门独立学科之后，其研究内容经历了重大的变化。在经典运筹学中，决策者并不包含在运筹学的研究对象之中，决策者是运筹学提供其研究成果的对象，即运筹学工作者的客户。自从人机交互形式的决策支持系统的研究出现以来，决策者与其提供决策根据、进行系统分析的工具（计算机和计算机网络）一起，形成运筹学的整个研究对象，决策者已被包含在运筹学的研究对象之中。20 世纪末出现的研究专题组织化智能，已使决策者、专家、计算机及其网络一起，以及它们之间的交互作用，形成运筹学的整个研究对象。

作为具有相对独立性质的学科与技术，运筹学与最优化技术的发展过程具有密切联系，并且彼此在其发展中起着相辅相成的作用。在运筹学发展的初期，经典运筹学强调定量研究。这里的定量研究主要包括两个方面：其一是对作为研究对象的运筹系统做出定量的描述，该描述可以用数学模型或仿真模型表达；其二是给出能够定量地衡量运筹系统运作的优劣程度的效力度量，该度量必须能够明确地显示出它自身与系统的决策（控制）变量之间的依赖关系。经典运筹学之所以强调定量研究，其目的在于使决策与对于其所能选择或控制下的决策变量做出最优的选择。这里的最优是在这样的意义下理解的，即该选择能够使上述的效力度量达到最大值或最小值。由于在经典运筹学中，效力度量是以实数表示的，而且它能定量地反映运筹系统运作的优劣程度，因而上述意义上的最优性是有意义的。由此不难理解，最优化技术成为经典运筹学中的主要工具，后者是前者发展的主要推动力；反过来，最优化技术的发展又在运筹学从经典运筹学到现代运筹学的进化中起到了重大作用。

运筹学的发展历史

运筹学英文名为 operational research 或 operations research。“运筹”一词在我国出于《史记·高祖本纪》：“运筹于帷幄之中，决胜于千里之外。”在西方国家，如果从运筹学的酝酿（1935 年）算起，其至今已经有 70 多年历史了。但是多数研究运筹学的学者认为，从国际上学术界运筹工作的广度和深度看，运筹学作为一门独立的学科出现，还是从 20 世纪 60 年代开始的。

最早进行的运筹学工作是以英国生理学家希尔为首的英国国防部防空试验小组在第一次世界大战期间进行的高射炮系统利用研究。同时，英国人莫尔斯建立的分析美国海军横跨大西洋护航队损失的数学模型也是运筹学的早期工作，这一工作在第二次世界大战中有了深入而全面的发展。1938 年，英国空军就有了飞机定位和控制系统，并在沿海设立了雷达站，用来发现敌机。但在一次空防演习中，军方发现，由这些雷达送来的（常常是互相矛盾的）信息需要加以协调和关联，才能改进作战效能。于是提出了“运筹”的课题，为此，英国成立了专门的小组，由罗威把这一研究课题命名为“运筹学”。专门小组就成为空军运筹学小组，当时主要从事警报和控制系统的研究。1939 年至 1940 年，这个小组的任务扩大到包括



防卫战斗机的布置,对未来的战斗进行预测以供决策之用,这个小组的工作对后来的大不列颠空战的胜利起了积极的作用。

第二次世界大战中,运筹学被广泛应用于军事系统工程,除英国外,美国、加拿大等也成立了军事数学小组,研究并解决战争提出的运筹学课题。例如,组织适当的护航编队使运输船队损失最小,改进搜索方法,及时发现敌军潜艇;改进深水炸弹的起爆深度,提高毁伤率;合理安排飞机维修,提高飞机的利用率等。这些运筹学成果对盟军大西洋海战的胜利起了十分重要的作用,对其他许多战斗的胜利也起了积极的作用。战争结束时,在英美及加拿大军队中工作的运筹学工作者已超过了700人。正是由于战争需要的促进,运筹学有了长足的发展,并已形成为一门学科。

1948年,美国麻省理工学院率先开设了运筹学课程,许多大学争相效仿,于是运筹学成为一门学科,内容也日益丰富起来。1950年,美国出版了第一份运筹学杂志。1951年,莫尔斯(Morse)和金伯尔(Kimball)出版了《运筹学方法》一书,这是第一本以运筹学为名的专著,书中总结了第二次世界大战中运筹学的军事应用,并且给出了一个运筹学的著名定义:运筹学是为执行部门对它们控制下的“业务”活动采取决策并提供定量依据的科学方法。

最早建立运筹学会的国家是英国(1948年),接着是美国(1952年)、法国(1956年)、日本(1957年)和印度(1957年)等。1959年由英、美、法3国的运筹学会发起,成立了国际运筹学联合会(IFORS),以后各国的运筹学会纷纷加入(中国1982年加入)。IFORS现在已有44个成员国,包括了世界各主要发达国家和有影响的发展中国家。三年一次的世界范围的IFORS大会已举行了14次,运筹学方面的期刊已逾百种。这些事实说明,运筹学作为一门独立的新兴学科,早已为国际社会所公认。

第二次世界大战结束后,运筹学的研究中心从英国转移到了美国,从军事部门扩展到了管理部门,研究的范围也在逐步扩大。但是运筹学的真正发展是在20世纪五六十年代,其标志是1949年线性规划理论的建立;之后非线性规划(1951年)、网络流(1954年)、随机规划(1955年)、数学规划(1958年)等理论相继创立,其他方面,如:排队论、存储论和马氏决策理论在同期也得到了迅速的发展。与此同时,运筹学的应用遍及经济和社会生活的各个部门与领域。

3. 控制论

控制论是由维纳(N. Wiener)创立的,其标志是1948年出版的专著《控制论或关于在动物或机器中控制和通信的科学》,控制基本模型是线性系统 $\frac{dx}{dt}=Ax+u$,其中 u 为控制项,表示来自系统外的作用,当 u 为不可控项时即成为随机系统。控制论发展的一大特点是它同时在理论和技术上并驾齐驱,比如在反馈控制、系统识别和鲁棒控制上都同时体现了理论和技术的并行性,也因此使其发展更为迅猛,同时使得控制论很快被移植应用到包括经济、管理、社会等各种领域。控制论提炼出的基本概念,诸如目的、行为、通信、信息、输入、输出、反馈、控制以及在这些概念基础上的控制论系统模型,即输入—输出反馈控制模型,具有广泛的普遍适用意义,并且紧密联系着基础理论和应用技术两头。从一定意义上说,半个世纪以来,系统科学的发展在总体上是和控制论的发展紧密相关的。



维纳的学术贡献

维纳 (N. Wiener), 美国数学家。1894 年 11 月 26 日出生在美国密苏里州哥伦比亚市的一个犹太人的家庭中。他自幼聪慧, 12 岁进入土夫兹学院学习, 15 岁获数学学士学位, 其后进哈佛大学作了一年动物学研究生, 因觉察自己不适合在实验室工作而改修哲学, 19 岁以关于数理逻辑的论文获博士学位, 同年夏天获得奖学金到英国剑桥向罗素学习, 并从师于哈代 (Hardy)、李特尔伍德 (Littlewood) 等人, 打下了分析学的基础。他先后从事教员、工人、编辑、弹道试验场电话员、专栏作家等多种职业。1919 年到麻省理工学院任讲师之后, 开始了他的数学学术生涯, 1929 年任麻省理工学院副教授, 1932 年以后一直为该校教授, 1933 年任美国国家科学院院士。20 世纪 30 年代开始, 维纳关注布什研究的模拟计算机, 第二次世界大战开始后, 他参加火力控制研究, 从而使他进入到控制论的研究和创立的过程中。1948 年他发表了划时代的著作《控制论》。

第二次世界大战中, 维纳从事防空火力自动控制装置的研究, 对系统通过信息交换和处理进行控制的机制深有领悟。维纳将数学工具应用于火炮控制系统, 处理飞行轨迹的时间序列, 提出了一套预测飞机将要飞到位置, 使火炮准确击中的最优办法。火炮控制系统中一个重要的问题就是如何将控制装置的误差反馈回来作为修正下一步控制的依据。维纳从生理学家罗森勃吕特那里了解到人的神经系统与火炮控制系统有相似之处, 都有反馈不足和过度的问题, 本质上是对信息的一种处理。于是开始找到了人、动物与机器在控制、通信方面的共同点。在这些研究活动中, 他抓住了自动控制过程中的两个核心概念即“信息”和“反馈”的概念, 构造了控制论的基本框架。1943 年维纳与别格罗和罗森勃吕特合作发表《行为、目的和目的论》一文, 从反馈角度研究了目的性行为, 找出了神经系统和自动机之间的一致性, 阐明了控制论的基本思想。1948 年, 维纳所著的《控制论》一书出版, 奠定了这门新学科的理论基础, 标志着控制论的正式诞生。他把控制论定义为“关于在动物和机器中控制和通信的科学”。1950 年, 维纳发表《人有人的用处——控制论与社会》一书, 对控制论作了更加广泛通俗的阐述。

维纳并没有把控制过程局限在自动机领域。他意识到, 以信息和反馈为基本机制的控制过程, 不仅可以用来描述自动机, 而且也可以用于神经系统以及更大范围的其他领域。维纳还意识到控制论系统关系到的不仅仅是工程或生物领域, 还应该包括社会和文化问题。维纳可以说是 20 世纪少数几个“探索型”科学家之一, 具有敏锐的哲学头脑, 总是不断把探索的目光投向新领域。如果说贝特朗菲的一般系统理论启动了当代西方系统运动的话, 维纳的控制论则为该运动开拓了广阔的前景和空间。

4. 信息论

信息论经历了 4 个阶段性发展, 首先, 公认的“信息”概念产生于 1922 年的“卡松法则”。其次, 1928 年哈特莱指出信息是符号、代码序列而不是内容本身, 或者说“信息是脱离了载体的属性”, 从而使信息技术得到了激活。第三, 香农创建的数学理论首次提出了信息 (非物质对象) 的度量公式 $H = -M \sum_{i=1}^n p(i) \lg p(i)$, 其中 H 表示信息, M 为常数, $p(i)$ 为事件 i 发生的概率。第四, 信息论的继续发展为控制论和计算机技术发展起到了很好的理论基础作用。



1948年电子计算机的诞生,首先标志着人类对信息处理本质的深刻认识。信息处理原本是人的智能,电子计算机的诞生就宣告了对人类智能的机理有了基本的本质性认识,并且实现了人的处理信息的智能可以部分由人造物代替。香农的信息论撇开了所谓信息的语义,从信息的语法方面建立了传递信息的通信系统模型。冯·诺伊曼(von Neumann)运算规则实现了一种处理信息的“物理符号系统”,这是人类智能物化的伟大起点。目的、行为、控制、信息、语法、语义、智能等本来都是表征人的活动的词汇,由于控制论、信息学的发展,这些词汇也被赋予了机器等人工物。

运筹学、控制论和信息论的成就,就把科学的、定量的系统思想的适用范围,从自然物扩展到人工物,从“物理”扩展到“事理”;为系统科学横断自然科学、社会科学和工程技术的基本特征的形成奠定了基础。

信息论创立者香农

香农(Shannon),美国应用数学家。1916年生于美国密执安州的加洛德。在大学时他就表现出了对数理问题的高度敏感,1940年获得麻省理工学院博士学位。1941年香农以数学研究员的身份进入新泽西州的AT&T贝尔电话公司,就职于贝尔电话研究所。在这个世界最大的通信公司研究基地里,他受到前辈工作的启示,其中最具代表性的是《贝尔系统技术》杂志上所披露的奈奎斯特的《影响电报速率的一些因素》和哈特莱的《信息的传输》。正是他们最早研究了通信系统的信息传输能力,第一次提出了信息量的概念,并试图用数学公式予以描述,香农则创造性地继承了他们的事业,在信息论的领域中钻研了8年之久,最终于1948年也在《贝尔系统技术》杂志上发表了244页的长篇论著,这就是《通信的数学理论》。次年,他又在同一杂志上发表了另一篇名著《噪声下的通信》。在这两篇文章中,他解决了过去许多悬而未决的问题:经典地阐明了通信的基本问题,提出了通信系统的模型,给出了信息量的数学表达式,解决了信道容量、信源统计特性、信源编码、信道编码等有关精确地传送通信符号的基本技术问题。两篇文章成为现代信息论的奠基著作。而香农也一鸣惊人,成为这门新兴学科的奠基人。那时,他才刚刚30出头。1956年他成为麻省理工学院客座教授,并于1958年成为终身教授,1978年成为名誉教授。香农博士于2001年2月26日去世,享年85岁。

信息论是研究信息的基本性质和度量方法以及信息的获得、传输、存储、处理和交换等一般规律的科学。香农首先把信息传输过程理想化为5个部分,即信息源、发送器、信道(传输媒介)、接收机、信息接受者。其次,他提出信息量的量化概念,即把信息同熵联系起来。他提出了信道定理,即信道容量是信道能够几乎无误差地传送信息的最大速度,在这个速度之内,信道原则上可以无限地降低噪声造成的误差。信息论最重要的贡献在于把通信过程看成是一种信息的传输过程,而信息本质上是统计的,其量化形式与熵密切关联。香农的信道定理可以看成是热力学第二定律在通信问题中的特殊形式。

5. 系统工程、系统分析与管理科学

20世纪三四十年代工程技术有了巨大进步,加上第二次世界大战的影响,更有了飞速的发展。随着生产规模越来越大,生产技术越来越复杂,科学研究涉及的专业和部门越来越多。这些大规模的生产系统、技术系统和科学系统由许多部分组成,关系错综复杂,需要人



们从整体和相互联系的角度去考虑问题,需要制定一套处理复杂系统和组织工作的科学方法及程序。20世纪40年代,美国贝尔电话公司首先使用了“系统工程(systems engineering)”命名设计新系统的科学方法。1957年,美国密执安大学的古德(H. Goode)和麦考尔(R. E. Machol)合作出版了第一本以“系统工程”命名的书。第二次世界大战后,美国的兰德公司,针对大型社会、经济系统问题的研究,倡导“系统分析(system analysis)”,着重于在解决大型社会经济系统中的问题时,对若干可供选择的执行特定任务的系统方案进行选择、比较,进行费用、效果分析。此外,针对大企业的经营管理技术的发展,以泰勒(F. W. Taylor, 1856—1915年)为代表的科学管理发展成为管理科学(management science)。1969年,阿波罗飞船登月成功,被公认为是系统工程成功的范例,引起了人们对系统工程的广泛重视。目前,国际上量化系统思想和方法的实际应用基本上仍沿着这3大学科蓬勃发展。

6. 博弈论

博弈论是博弈双方(二元)或多方(n 元)以竞争为关系,以获取合理的资源配置为最高目标的一类多层系统。由于具有强烈的战争和赌博背景,博弈论的思想萌芽很早,但公认博弈论作为学科的诞生标志是1928年冯·诺伊曼(von. Neumann, 1903—1957年)证明了博弈论基本定理:每个矩阵博弈皆可通过引进混合策略而被严格决定。特别以1944年冯·诺伊曼与奥斯卡·摩根斯坦(Oskar Morgenstern)合著的《博弈论和经济行为》一书作为现代博弈论的开始。它将博弈由2人情形推广到一般的 n 人情形;在代数博弈基础上产生了解析博弈乃至微分博弈;在零和博弈、非零和博弈基础上又产生了Nash均衡、Nash精细(稳定)均衡理论、种种联盟博弈理论和信息不对称博弈理论等。特别在今天,博弈论已成为经济学主流学科之一的“信息经济学”的理论基础,得到了更大的发展动力。

博弈论的发展历史

博弈论是微观经济学发展的革命性成果,1994年诺贝尔经济学奖授予了为此作出突出贡献的3位数学家和经济学家纳什、海萨尼、泽尔胜。作为着力于研究“理性人的互动行为”的一门学科,博弈论几乎可以被运用于经济学和其他社会科学的各个领域。奥曼在权威的《帕尔格雷夫大辞典》中的《博弈论》对这门学科在20世纪80年代中叶以前的发展成果做了精致的介绍。继博弈论的开创者冯·诺伊曼和经济学家摩根斯坦的巨著《博弈论和经济行为》之后,20世纪90年代的几本教科书性质的专著,加上奥曼和哈特主编的百科全书式的《博弈论及其应用手册》,对博弈论做了全面系统甚至可以说是包罗万象的探索。

博弈论的近期发展表明,它本质上依赖于两个东西,即博弈者的知识和技术。博弈者的技术决定了博弈的物理框架,即每个博弈者的策略集合建立在策略组合上的支付函数等(在数学上,存在着无穷多种可能的博弈结构,而在经济学意义上,选择什么样的博弈结构来解释现实中的现象,正是博弈论学者需要着力解决的),而博弈是如何进行的,即什么样的博弈解是合理的,则由博弈者的知识决定。

博弈论是循着从零和博弈到非零和博弈、从完全信息博弈到非完全信息博弈、从静态博弈到动态博弈的路径发展的。在冯·诺伊曼的最大最小定理之后,纳什于1951年做出了里程碑式的贡献,为非合作博弈提供了一个最重要的解概念。后来大家发现纳什均衡要求完全



信息,而现实中更多的不完全信息博弈依然无法处理。海萨尼于1967年提供了一个方案(Harsanyi doctrine),把正规型不完全信息博弈转化为贝叶斯博弈,并定义了贝叶斯博弈的纳什均衡解,即贝叶斯—纳什均衡。当代博弈解的研究几乎都是围绕纳什均衡的加强与减弱进行的。

虽然人们通常认为纳什均衡是非合作博弈最可接受的解概念,但奥曼(Aumann)、伯恩亥姆(Bernheim)和皮尔斯(Pearce)等人指出,比纳什均衡更弱的概念,如重复优越解(iterated dominance,即劣策略重复剔除解)、可合理化解(rationalizability)、相关均衡解(correlated equilibrium),也有成为博弈解的很好的理由。问题的关键是我们赋予博弈者什么样的知识结构。伯恩亥姆于1986年建立了一个公理模型来区分这四类解。在普遍知识(common knowledge)的框架下,这方面的问题是当前博弈论研究的热点,在1995年世界经济学家大会论文集中有一篇极好的综述。

不仅如此,在很多博弈中,往往有多个纳什均衡解,其中有的是很不合理的,比如包含了不可置信的威胁(incredible threaten),如何剔除这些不合理的解几乎是博弈论研究的核心。学者们发展了众多纳什均衡的提炼来解决这一问题。对正规型博弈有吴文俊和江嘉禾的本质均衡(essential equilibrium)、完美均衡(perfect equilibrium)、正当均衡(proper equilibrium)、持久均衡(persistent equilibrium);对扩展型博弈则有子博弈完美均衡(subgame perfect equilibrium)、颤抖手完美均衡(trembling hand perfect equilibrium)、序贯均衡(sequential equilibrium)等。另外,海萨尼和泽尔胜于1988年还发展了一套均衡筛选方法。

在尝试给博弈解提供基础的工作中,除了前述以奥曼为代表的知识论观点,还有以宾莫尔为代表的进化论观点。后者通常怀疑关于理性的普遍知识假设的适用性,并希望代之以有限的、进化的理性。在他们的研究中,有一个方向是,利用数学中的元胞自动机来模拟博弈者,并以自动机的计算复杂性来刻画博弈者的有限理性,而围绕进化稳定策略的进化博弈现在也越来越重要。随着动力系统理论和复杂性研究的方法被越来越多地引入,预示着博弈论进入另一个大发展时期。还有,罗伯特·艾克斯罗德(Robert Axelrod)等于1984年运用计算机进行博弈实验,求解合作的进化,发展了实验经济学,也是博弈论发展的一个重要方面。至今,共有6次诺贝尔经济学奖授予了博弈论领域的研究学者。法国现代艺术家G. Mathieu曾于1971年为巴黎的Monnaie博物馆设立了18个奖章以纪念西方文明发展的18个里程碑,其中,公元313年米兰的法典是第一个,而1944年提出的博弈论被列为第十七个。

冯·诺伊曼的科学贡献

诺伊曼(Von Neumann),美籍匈牙利人。1903年12月28日生于匈牙利的布达佩斯,父亲是一个银行家,家境富裕,十分注意对孩子的教育。诺伊曼从小聪颖过人,兴趣广泛,读书过目不忘。6岁时就能用古希腊语同父亲闲谈,一生掌握7种语言,最擅长用德语思考,并能同步转译为英语。他对阅读过的文献能快速并一字不差地复述出来,而且在若干年之后,仍可如此。1911—1921年,诺伊曼在布达佩斯的卢瑟伦中学读书期间,就崭露头角而深受老师的器重,在费克特老师的特别指导下,合作发表了第一篇数学论文,当时他还不满18岁。1921—1923年在苏黎世大学学习,1926年以优异的成绩获得了布达佩斯大学数学



博士学位, 1927—1929 年相继在柏林大学和汉堡大学担任数学讲师, 1930 年接受普林斯顿大学客座教授的职位, 西渡美国, 1931 年成为该校终身教授, 1933 年转到该校的高级研究所, 成为最初的 6 位教授之一, 并在那里工作了一生。诺伊曼是普林斯顿大学、宾夕法尼亚大学、哈佛大学、伊斯坦堡大学、马里兰大学、哥伦比亚大学和慕尼黑高等技术学院等学校的荣誉博士, 也是美国国家科学院、秘鲁国立自然科学院和意大利国立林业学院等学院的院士。1954 年任美国原子能委员会委员, 1951—1953 年任美国数学会主席。1954 年夏他被确诊患有癌症, 1957 年 2 月 8 日在华盛顿去世, 终年 54 岁。

诺伊曼在数学的诸多领域都进行了开创性工作, 并做出了重大贡献。在第二次世界大战前, 他主要从事算子理论和集合论等方面的研究。1923 年关于集合论中超限序数的论文, 显示了诺伊曼处理集合论问题所特有的方式和风格。他把集合论加以公理化, 他的公理化体系奠定了公理集合论的基础。他从公理出发, 用代数方法导出了集合论中的许多重要概念、基本运算、重要定理等, 特别在 1925 年的一篇论文中指出了任何一种公理化系统中都存在着无法判定的命题。1933 年解决了希尔伯特第五问题, 即证明了局部欧几里得紧群是李群, 1934 年把紧群理论与波尔的殆周期函数理论统一起来。他还对一般拓扑群的结构有深刻的认识, 弄清了它的代数结构和拓扑结构与实数是一致的。他对其子代数进行了开创性工作, 并奠定了它的理论基础, 从而建立了算子代数这门新的数学分支, 这个分支在当代的有关数学文献中均称为冯·诺伊曼代数, 这是有限维空间中矩阵代数的自然推广。其在格论、连续几何、理论物理、动力学、连续介质力学、气象计算、原子能和经济学等领域都做过重要的工作。诺伊曼还创立了博弈论这一现代数学的又一重要分支, 1944 年发表了奠基性的重要著作——《博弈论和经济行为》, 该书包含了对博弈论的纯粹数学形式的阐述以及对于实际博弈应用的详细说明, 还包含了诸如统计理论等教学思想。

二、自组织系统理论的形成和发展

(一) 耗散结构论

耗散结构论是比利时物理化学家普利高津 (I. Prigogine) 于 1969 年在一次“理论物理和生物学”国际学术会议上首次提出的一种理论。这种理论认为, 一个远离热力学平衡态的开放系统, 在与环境不断进行物质、能量和信息的交换过程中, 一旦系统某个参量变化达到一定阈值, 通过随机涨落, 系统就可以从无序状态变为有序状态或由比较有序状态变为更为有序状态, 形成一种新的宏观有序结构。他把这种在远离平衡态情况下所形成的新的有序结构叫做耗散结构。耗散结构理论成功地解决了长期困扰人们的关于系统的自组织现象, 在科学上具有重要理论、实践和哲学意义, 因而他获得了 1977 年诺贝尔化学奖。

耗散结构论的典型动力系统模型是有名的布鲁塞尔振子:

$$\begin{cases} \dot{x} = a - bx + x^2y - x \\ \dot{y} = bx - x^2y \end{cases}$$

普利高津结合“熵”概念、开放系统和非线性系统的分析, 提出了能量转换、远离均衡、涨落、自组织等新概念, 终于给出一套具有普遍适用性的一般系统的能量交换过程描述, 揭示出系统演化的本质性特征。