

## 系统科学及系统复杂性研究

戴汝为

(中国科学院自动化研究所系统复杂性研究中心, 北京 100080)



**摘要:** 众所周知, 系统科学与“复杂性”的研究有着十分密切的联系。本文从现代科学技术体系的观点, 介绍系统科学在中国的发展, 而且讨论了与系统科学相关的“系统复杂性”的研究。同时讨论了系统科学的三个层次: 基础理论研究层次, 包括“系统学”; 技术科学层次, 包括工程控制论与运筹学; 工程应用层次包括各种系统工程。还有从系统科学通向马克思主义哲学的称为“系统论”的桥梁。最后归纳了与“系统复杂性”相关的主要传统的和新兴的研究课题。

**关键词:** 系统工程; 工程控制论; 系统学; 系统复杂性

**中图分类号:** TP1; N94

**文献标识码:** B

## Research On System Science and System Complexity

DAI Ru-wei

(System Complexity Research Center, Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract:** It is well known, the system science is highly related to research on “complexity of system”. The development of system science in China from the point view of modern science and technology architecture is summarized in this article. The three layers of system science are also described. The basic theory research layer includes systematology, the technical science layer includes engineering cybernetics and operational research, and the engineering application layer includes various kinds of system engineering. In addition, there exists a bridge named “systematics” connecting system science with Marxist philosophy. Finally, some topics of “complexity” proposed in the past and nowadays are also summarized.

**Keywords:** system engineering; engineering cybernetics; systematology; system complexity

## 1 引言

近年来, 国内、外对于“复杂性(Complexity)”研究的关注程度大有增长之势, 究其原因, 一方面是人们对学科交叉发展与整合的重要意义的认识越来越深; 另一方面从整个科学发展所面临的挑战来看今后的发展。

复杂系统, 或系统复杂性研究的范围很广, 牵涉到近年来不同领域中人们关心的热点问题。关于复杂性问题的看法由于角度各异, 往往出现分歧。值得注意的是, 1999年4月美国《科学》(science)杂志出版了“复杂系统”的专辑。两位编者 Richard Gallagher 和 Tim Appenzeller 在其以“超越还原论”为标题的导言中, 对他们所指的“复杂系统”作了如下简单描述: 通过对一个系统的分量部分(子系统)性能的了解, 不能对系统的性能作出完全的解释, 这样的系统称为“复杂系统”。用通俗一点的说法, 对于复杂系统, 整体的性质不等于部分性能的和, 即系统整体与部分之间的关系不是一种线性关系。这一说法虽然很简单, 但在科学的方法论方面却引起了人们的注意与反思, 也就是处理与解决复杂系统有

关问题, 几百年来科技界所用的还原论方法论有所不足, 还需要新的方法<sup>[1]</sup>。“复杂系统”这一专辑的编者针对容易出现的问题, 把握住两点: (1) 有意避开学术术语的雷区; 美国学者在学术术语方面喜欢“创新”, 有位美国学者曾有这样的表达: 宁愿用别人用过的牙刷, 也不愿用别人用过的术语。从而可见其特点, 对传统的先建立严格定义再进一步进行方法与体系的研究的做法敬而远之。对于复杂性研究这类还处于萌芽状态的科学领域, 一开始就建立严格的定义, 对敞开思想、有所创新不见得有积极的作用。(2) 尽量避开一个名词究竟表达什么含义(即语义)的争论, 大部分人对这种争论的效果不佳往往都有所体会。两位编者从复杂性研究的主流出发, 经过精心安排, 邀请了物理、化学、生物、经济、生态、地理环境、气象、神经科学等方面的著名科学家撰写他们所从事的领域中, 关于复杂系统的研究进展; 为了对各领域所作的贡献不加以人为的约束, 对被邀请撰稿的专家来说, 研究性的含义指的是他们在本学科中所确定的含义, 并不强求为大家所认可; 并简短地给出所说的复杂性概念在他们从事的领域中到目前为止所起到的影响; 预测如何能推动今后的发展方向, 并讨论在一个领域内的发展, 能否移植到其他领域。

大家知道, 目前国内外对复杂系统的研究, 对学科交叉发展, 不同学科的融合重要的意义有进一步的了解; 但从

收稿日期: 2002-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目“认知复杂性研究”资助(79970119)

作者简介: 戴汝为(1932-), 男, 云南昆明人, 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为自动控制、模式识别、人工智能、复杂性科学及思维科学。

实际出发,当前人们面临着必须处理与解决的种种复杂问题;如全球经济的可持续发展,生态环境保护及区域规划等。在这种类型的系统中,与以往的工程系统的明显不同之处是往往大量活的、有生命的物体,如动物和人作为系统中的部分(子系统)。这些子系统相互之间有强烈的交互作用,这样的系统称为“开放的复杂巨系统”(Open Complex Giant system)。这类系统及其处理的方法是我国著名科学家钱学森于 80 年代末,针对一些复杂的系统所概括和提炼出来的。复杂巨系统包括的子系统很多,成千上万甚至上亿万,它的性质可以概括如下:(1) 开放性:系统本身及其子系统与周围的环境有物质的交换、能量的交换和信息的转换。(2) 复杂性:系统中子系统的种类繁多,子系统之间有交互作用。(3) 层次性:已经认识得比较清楚的子系统到可以宏观观测的整个系统之间层次很多,甚至有几个层次也不清楚。很明显,开放的复杂巨系统超出了还原论的范畴。以知识渊博著称、“对两弹一星”作出重大贡献的钱学森院士对复杂性的看法是:复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特性。他在 1990 年 8 月 14 日发表于《人民日报》题目为“要从整体上考虑并解决问题”的文章中明确提出“我们现在要重视复杂性的问题。而且我们要看到解决这些问题,科学技术就将会有一个很大的发展。我们要跳出从几个世纪以前开始的一些科学研究方法的局限性。我们既反对唯心主义,也反对机械唯物论。我们是辩证唯物主义者。在这方面我们是居于优势,千万不要妄自菲薄。”

## 2 系统科学在中国的进展

前面所谈到的复杂性,可以说主要是谈的系统复杂性。这与系统科学有密切的联系。关于系统科学,这里引用德国著名系统科学家哈肯(H. Haken)的两段话。他在许国志主编的《系统科学大辞典》的序言中写道:“系统科学的概念是由中国学者较早提出的。我认为这是很有意义的概括,并在理解和解释现代科学,推动其发展是十分重要的。”又写道:“中国是充分认识到系统科学巨大重要性的国家之一。”2001 年,钱学森的专著《开创系统学》一书<sup>[2]</sup>,在国内出版,通过这本书使人们可以对系统科学在我国的发展以及国外专家对这方面的评价,有一个比较清晰的了解。

下面先谈谈钱学森从整体考虑,经多年的思考提出的现代科学技术体系<sup>[3]</sup>。这个体系从纵向分为三大层:最高层是马克思主义哲学。马克思主义哲学、辩证唯物主义是人类一切知识的最高概括;从智慧形成的角度,以“性智”与“量智”来概括各科技部门及文艺活动与美学对人类的“性智”与“量智”两种类型智慧的形成与影响;最下面一层是现代科学技术十一大部门,即自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、地理科学、军事科学、行为科学、建筑科学以及文艺理论与文艺创作;并分别通过 11 座“桥梁”:自然辩证法、唯物史观、数学哲学、系统论、认识论、

人天观、地理哲学、军事哲学、人学、建筑哲学和美学,把马克思主义哲学与十一大科技部门联在一起。

现代科学技术体系是钱学森从整体上加以考虑提出来的,在每一大部门中,又分为“基础理论”、“技术科学”及“应用技术”三个层次。在十一大部门之外,还有未形成科学体系的实际经验的知识库,以及广泛、大量成文或不成文的实际感受,如局部的经验、专家的判断、行家的手艺等等也都是人类对世界认识的珍宝,不可忽视,亦应逐步纳入体系。总之,这一分类法显示出这十一大部门之间本来就有的互相联系、互相促进、不可分割的关系,并揭示了马克思主义哲学与各门具体科学技术必然地、紧密地熔铸一起的内在关系,形成统一完整的现代科学技术体系。以上所述的现代科学技术体系是他近些年来心血与智慧的结晶,充分体现出他的“集大成”的智慧。

钱学森在逐渐形成他对现代科学体系结构的过程中,还对一些新兴的科学技术部门如系统科学、思维科学、人体科学等科学技术部门进行了研讨。对于系统科学的体系,他作了如下阐述:系统科学的应用技术就是系统工程、自动控制等;技术科学层次的是运筹学、控制论、信息论;基础理论是系统学。系统科学到马克思主义哲学的桥梁是系统论。下面分别介绍他对系统工程、工程控制论及系统学的开创性工作。按照历史发展的先后顺序,我们先从工程控制论谈起。

### 2.1 工程控制论<sup>[4]</sup>

相对论、量子论以及控制论被人们认为是 20 世纪上半叶的三项重大科学伟绩。1948 年美国科学家 N. Wiener(维纳)发表了专著《控制论》一书,其英文书名是《Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine》。经后人研究,1935 年维纳在清华大学做了一年的访问教授,所以有一种说法:控制论的思想起源于清华大学。

《控制论》发表的时候,钱学森在美国,已经是著名的力学家,他亲身参与了美国应用力学的发展,经历了流体力学作为一门技术科学,怎样从水利工程师、气象工程师、空气动力工程师以及其它领域工程师们的工程技术实践中加以总结提高,从而分离出来的过程。由于有了流体力学提供的理论与方法。上述领域的工程师们才能在他们日常的工程技术实践中分离流体力学研究成果。至少可以说,如果没有流体力学提供的理论与方法,肯定会对超声速流动的了解与利用大为延迟。站在这样的科学思想和方法论高度,钱学森在四十年代末、五十年代初对二次世界大战后迅速发展的控制系统与制导工程技术实践进行全面观察时,基于他在火箭技术方面的丰富经验,迅速认识到维纳所创立的控制论的重要性,并很快运用控制论的原理解决了一批喷气技术中的问题。诸如,火箭喷管的传递函数、远程火箭的自动导航以及火箭发动机燃烧的伺服稳定以及火箭制导系统的噪声过滤问题等。他以敏锐的眼光去发现、提炼出指导控制与制导

系统设计的普遍性概念、原理、理论和方法，从而创建了作为一门技术科学的工程控制论。他首先于 1953 年底在美国加州理工学院开设了“工程控制论”的课程，接着于 1954 年在美国出版了《Engineering Cybernetics》(工程控制论)一书。该书中，除了一些控制系统的基本原理与数学工具外，书的中心部分都是由钱学森结合火箭技术的研究成果组成。该书把一般性、概括性的理论和实际工程经验很好地结合起来，对工程技术、各个系统的自动控制和自动调节理论作一个全面的探讨。它一方面奠定了工程控制论这门技术科学的理论基础，另一方面指出这门新学科今后的几个新方向。1955 年他冲破重重阻碍返回祖国，在回国前夕，他带着妻子和幼小的儿女向他的恩师 Von Karman(冯·卡门)告别时，手里拿着一本刚出版的《工程控制论》以及他自己写的讲物理力学的讲义送到老师手里，当时年已七十四岁的力学大师冯·卡门看了看，很有感慨地对他说：“你现在在学术上已经超过了我”。钱学森听了老师的话，激动极了，心想我 20 年奋斗的目标，现在终于实现了。我钱学森在学术上超过了这么一位世界闻名的大权威，为中国人争了气。

值得一提的是 2000 年国际著名的自动控制理论专家 Astrom 在他刚出版的一本新书中，一开始就引用了《工程控制论》“序言”中的一段话：“这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素，可在其他各门自然科学中这些因素都是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质以及整个系统的总的运动状态。”如果我们着眼于物理世界三个要素的分析：物质、能量和信息，那么控制论只研究信息与控制，它不讨论能量和物质。由此可以看出钱学森早在 1955 年已经把研究的“着眼点”转到“信息与控制”方面了。后来，他倡导了以信息处理为核心的思维科学的研究，提出智能计算机是尖端技术的观点，看来早就有了思想准备。

## 2.2 系统工程

早在 1963 年，钱学森在参加第二个科学规划时，就提出要搞系统工程。在他主持国防部五院工作时就建立了总体设计部。这个部门的工作实际上就是航天系统工程。据系统工程专家许国志院士提供的历史事实：钱先生在美国期间，有相当长一段时间是在加州理工学院的喷气推进实验室(JPL)工作(JPL 是美国导航航天技术的摇篮)。他曾经是这个实验室的第一任主任兼哥达德(Goddard)讲座教授。第二任讲座教授也是后来成为 JPL 主任的匹克林(Pigkling)教授，这位教授在 20 世纪 60 年代写过一篇文章，关于 JPL 系统工程发展史方面的记载，提到该实验室从事系统工程工作的历程。其发源正是钱学森担任该实验室主任的时期。

1978 年钱学森和许国志、王寿云在文汇报上发表了“组织管理的技术——系统工程”；该文阐述了系统工程的内容、理论基础及有关的学科：“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，是一种对所有的“系统”都具有普遍意义的科学方法。系统工程是一个总类名称。因体系性质不同，还可以再分，如打仗的组织指挥叫军事系统工程，国家机关的行政办公叫行政系统工程等。系统工程的数学基础除了一般谈到的数学基础之外，还有统计学、概率论。控制论，包括大系统理论也是系统工程的基础，总之可以说系统工程的建立是由于现代大规模工农业生产和复杂的科学技术体系的需要，以及电子计算机的出现才促成的。系统工程居系统科学的应用技术层次，对我国的经济建设与国防建设具有十分重要的作用。1982 年湖南科学技术出版社出版了钱学森等《论系统工程》一书。后来经过大家的努力，系统工程的应用普遍的开展起来。现在许多人，包括一些领导同志，脱口而出的一个名词就是系统工程，媒体上更是经常出现。

钱学森通过自己在“两弹一星”等工程的实践，在 1981 年夏到 1982 年 10 月，提出把博弈论和系统科学结合起来用于结构复杂、成员众多的对阵集团。他在指导已故的王寿云同志(原国防科工委科技委副主任)编著《现代作战模拟》一书的讨论中，从兰彻斯特(F. W. Lanchester)和奥谢波夫(M. Oshpov)的工作中，提炼出半经验、半理论的处理复杂对阵问题的方法论，并在后来的工作中赋予这一方法论更广泛的涵义，概括为处理复杂行为系统的定量方法。这种方法是半经验、半理论的。提出经验性假设(猜想或判断)，是建立复杂行为系统数学模型的出发点。这些经验性假设不能用严谨的科学方式证明，但需要用经验性数据对其确实性进行检测。从经验性假设(猜想或判断)出发，通过定量方法途径获得的结论，依然具有半经验、半理论的属性。当人们寻求用定量方法处理复杂系统时，容易注意数学模型的逻辑处理。而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道，这样的数学模型看来“理论性”很强，其实不免牵强附会，从而脱离真实情况。与其如此，反不如从建模一开始就老老实实承认理论的不足，而求援于经验性判断，让定性的方法与定量的方法结合起来，最后定量。这样的系统建模方法是建模者判断力的增强与扩充。

## 2.3 系统学

钱学森认为他对系统学的认识始于 1955 年，当时他返回祖国与许国志先生在同一条船上，共同谈起运筹学问题，两位科学家有许多共同的认识，都感到这个问题是对新中国的社会主义建设会有很大帮助。回国后在科学院力学所成立了运筹学研究室，许国志任主任，研究工作就是从那个时候开始的。可以说系统学是从运筹学发展而来的。

2001 年在钱学森先生 90 华诞到来的时候，山西科学技术出版社出版了他的著作《创建系统学》一书。这本书集中反映了他于 80 年代通过讨论班的方式致力于“基础理论”层次的研究，创建系统学的工作；经过大家 10 多年的努力

悟到开放的复杂巨系统这个概念。这个概念已经成为整个系统科学的核心概念。该书由三部分组成：一是在系统学讨论班及有关建立系统学的一些精彩的讲话。讨论班经常请有关的专家作报告，讲完某个具体问题并讨论后，钱先生总有一段即席发言、阐述自己的看法。二是他在这段时期所发表的一些学术论文，其中的“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”，以及“再谈开放的复杂巨系统”，既是原始创新，又对今后如何研究开放的复杂巨系统问题指出了明确的方向，也就是说对于复杂巨系统的研究，应该从实际出发，从一个一个具体的复杂巨系统去加以研究，从解决国家经济发展中遇到的问题与国防需要的问题出发进行研究。这些文章被誉为系统科学发展的又一个里程碑。三是他和国内一些学者就系统科学有关问题的通信。钱学森对于发扬科学民主的重要性极为重视。他这位国内外享有盛名的人给别人写信时，都是自己亲自动手，写完信后，复制留底，把原件寄给收信人。这种亲自动手，在讨论问题时平等待人，是非分明，明确阐明自己学术观点的作法，给收信人留下深刻的印象，并起鼓舞的作用。

该书的特色之一是提炼出开放的复杂巨系统及处理与解决有关开放的复杂巨系统问题的方法论：从定性到定量的综合集成法。这一方法论强调了在解决复杂问题时，要发挥人的“心智”以及计算机的高性能，把两者结合起来，这样，才能从宏观整体上看待与要考虑问题，又能从微观上给以处理，用计算机来加以操作与实现。我们可以认为，综合集成是人用计算机的软硬件来综合专家群体定性认识及大量专家系统所提供的结论及各种数据与信息，经过加工处理从而使之上升为对总体的定量的认识。综合集成的过程是相当复杂的，即使掌握了大量的定性认识，也不是通过几个步骤、几次处理就能达到对全局的定量认识。因为复杂的、智能型的问题往往表现为结构不良的问题(ill structured problem)，也就是说目标、任务范围、计算机允许的操作都不具有明确的意义，需要一种有反馈的过程来加以解放。结构不良的另一种含义是针对被解决的问题而言的，即所具有的知识是不完备或不一致的。例如对于同一个问题，两个专家的看法可能完全不同，发生了矛盾，这就必须靠人参与解决。另一方面当然也要发挥计算机快速处理的本领，形成人机结合的智能系统。该书的另一特色是在创建系统科学的过程中，作者十分关注与体现了学科的交叉与融合，最为明显的是系统科学与思维科学的融合。从现代科学技术体系结构来看，思维科学的理论基础是思维学与信息学；应用技术层次包括人工智能、计算机软件工程、情报资料库技术、文字学、密码技术等。后面两个层次的工作与信息技术有着十分密切的关系。在前面介绍工程控制论时，已经谈到过，作者的观点开始从现代力学转向信息与控制方面了。前面所说的综合集成法及其应用，是以当代信息技术为依托，例如从 Internet 上获取海量信息，利用知识工程的结果，把人的“心智”与计算

机的高性能相结合，都与信息技术紧密相关。这方面钱先生讲得很清楚，从定性到定量的综合集成法实际是：1. 综合集成定性认识达到对整体的定量认识。2. “法”即技术工程，是综合集成工程。3. 综合集成工程居思维科学的应用技术层次，创立并发展它将为思维科学的技术科学层次及基础科学层次(思维学)提供营养。由此可看出，从系统科学角度来看，开放的复杂巨系统与从定性到定量的综合集成法是系统学中的核心部分，从思维科学来看，综合集成工程(后来称为大成智慧工程)是思维科学的一项应用技术。

综上所述，钱学森在 1955 年回国后，从 1978 年倡导开展系统工程，发表了“组织管理的技术——系统工程”的文章开始，接着又在北京领导和组织了系统科学与思维科学两个讨论班。发表了许多有关这两门科学的开创性文章，并于 1990 年发表了“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”的文章，总结提炼出开放的复杂巨系统，以及处理这类系统的方法论，即从定性到定量的综合集成法，开辟了大成智慧工程领域；对于这个领域，实际是体现了系统科学与思维科学的许多构思的交叉与融合。

### 3 控制系统与知识系统的发展

有关系统的研究是从简单到复杂。在现实的生产活动中，所面临的控制问题十分复杂，有的包含着多种物理与化学的过程，有的控制对象具有不确定性而且会发生突变等。复杂系统的控制问题已经提到人们的面前。随着信息技术与高、新技术的发展及计算机的推广应用，在国民经济发展与国防建设中涉及全局性影响的系统往往朝着大型化和复杂化发展。关于什么是复杂系统，科技界有各式各样的说法。我们认为具有复杂行为的系统，表现在系统的部件之间，或子系统之间有着很强的耦合作用，具有难以线性化的非线性性质，所以会出现极限环甚至混沌现象。另外，系统具有高度的不确定性，要求具有实时性，而且难以用传统的方法来建立系统的数学模型。许多工业生产过程就是这种复杂系统的典型例子。还有，被控制对象本身虽然不复杂，但是对这种对象加以控制后所形成的系统是在复杂的环境之中运行的，由于环境的复杂而导致在这一环境中能够有效运行的系统也必然是复杂的。典型的例子是研制能为家庭生活服务的机器人。一个家庭这样的环境是很不规整的，因此家用机器人的控制也成为复杂系统的控制问题。这类问题用传统的控制理论与方法很难奏效。经过较长时期的孕育与发展，国内外已认识到把人工智能的原理与方法及人的经验与智能用于复杂系统的控制是解决复杂系统控制的主要途径，并开展了许多有意义的工作。例如在不了解对象动态特性的情况下，“用模糊控制”对倒摆的控制就是一个成功的例子。这可以认为是发展的第二个阶段，这个阶段特点是把人的知识与经验直接注入到控制系统中去。

与上述控制科学技术发展时代平行，我们要审视人们

使用计算机模仿人的智能,即人工智能,它也在演变。从科学的发展来看,40 年代初在第二次世界大战对科学技术的要求与影响下,计算机科学、控制论、人工智能等蓬勃发展起来,机器智能研究的兴起可以说是这个时期的产物。在人工智能(AI)研究方面,Turing 被后人尊为人工智能思想的奠基人;他的贡献在于对机器智能的描述,提出把基于离散量的递归函数作为智能描述的基础。另外,他提出了著名的“Turing”实验,给出了测试机器是否具有智能的基于行为主义的标准。早期的研究在用计算机证明数学定理,研制出具有学习功能的跳棋程序,把人工智能的研究结果用于解决困难的数学问题等方面取得了一些成就。这些成就使人倍受鼓舞,以至于对人工智能的发展作了过分乐观的估计。1958 年有的人工智能专家充满自信地预计:用不了 10 年,计算机将要成为世界象棋冠军;用不了 10 年,计算机将可以谱写出达到优秀作曲家水平的乐曲……然而人工智能研究的实践所给出的回答使人们的头脑冷静下来。实际的情况是从 60 年代到 70 年代,人工智能取得的成果远远达不到专家们的美好期望。但是在缓慢的进程中也取得了一些成果。其中,知识工程所取得的成就最使人工智能研究引以自豪。知识工程与通常人们所说的构建专家咨询系统,即以专家水平进行论断与咨询的计算机软件,只是说法的不同。知识工程的历史是以 1969 年美国著名的知识工程专家 Feigenbaum 公布第一个专家系统 DENDRAL 开始的,进而他在 1977 年的国际人工智能联合会议上综合与阐述了许多 AI 科技人员对 AI 研究的新起点,大体概括为:知识工程师所实践的技术是把人工智能研究中产生的原理和工具用到需要专家知识解决的那些应用难题上。获取知识,表达知识,并适当地应用知识来构造和说明推理路线等技术问题,是知识库系统设计中的重要问题。构造智能媒介这种技术是程序设计技术的一部分,也是它的扩充,用大量的知识来表达和推理也是制造复杂的计算机程序的技术;即改变了以往人们普遍认为几个推理定律再加上强大的计算机就会发生专家和超人的性能这一起主导作用的信念,人们认识到用以往所遵循的“通用的求解策略”这一能力有限的方法来解决很复杂的问题实在是难以达到目的,需要转向狭隘的应用问题。专家系统就是研究利用针对某个专门问题的专家知识建立人机系统的方法和技术来进行问题求解。专家的能力涉及专家两个方面的知识,即公开的知识和个人所掌握的经验性的知识。公开的知识包括事实和专业中的理论等,这种知识往往记录在教科书和参考书中;专家所掌握的知识指的是专家通过实践获得的经验知识,称为启发式(heuristic)知识。这种知识是专家区别于非专家的标志所在,能使专家在必要时作出经验性的判断,辨别哪些途径是有希望的解决途径,并能有效地处理错误或不完全的数据。可以说专家经验性的知识是专家能力的关键所在,专家系统或知识系统的威力是从它所处理的知识中产生的。由于科技人员把着重点放在解决狭隘定义

的应用问题,并且研制开发了大量的、各式各样的专家系统和决策系统。在国内,这门工程技术近 10 年才发展起来,并取得了较大进展。

我们花了不少篇幅讨论控制系统及知识系统的发展,这两种不同类型的系统是分别从不同的领域中逐渐发展和成熟起来的,两者的特点大不相同。在我国,人们正在致力于发展的第三个阶段,解决复杂系统的控制。钱学森等把系统的研究拓广到开放复杂巨系统的范畴。他们对各式各样的系统进行分类,并分析所遇到的各种系统;概言之,不外乎自然系统以及人所制造出来的人工系统两大类。再进一步,根据组成系统的子系统种类的多少和它们之间的关联关系的复杂程度又可以把自然系统和人工系统的种类再分为简单系统及巨系统两类,即:

(1) 简单系统:组成系统的子系统数量比较少,子系统之间的关系比较单纯,例如,一个温度控制系统就是一个人工简单系统。

(2) 巨系统:组成系统的子系统数量非常大、成亿、上百亿、千亿。如果系统中子系统的种类不太多,而且它们之间的关联关系又比较简单,则称为简单巨系统;如果子系统的种类很多,并且有层次结构,子系统之间的关系又很复杂,就称为复杂巨系统;如果系统又是开放的,开放是指系统与系统中的子系统分别与外界有各种信息交换,系统中的各子系统能够通过与周围环境的交互作用增加适应的能力,这种系统就称为开放复杂巨系统。例如生物体系统、人脑系统等。大多数的人造系统都是简单系统,如一般的控制系统或信息系统,而且不具有开放性。就是自动化工厂也不过是人工的大系统而已。至于开放的复杂巨系统,这种系统无论在结构、功能、行为方面都很复杂,以至于到今天它的大多数性能我们还不清楚。对于开放复杂巨系统的研究,钱学森提出处理这种系统的方法是“从定性到定量的综合集成”(metasynthesis)。这不仅为开放复杂巨系统的研究,而且为智能系统的研究打下基础,为把群体专家的知识经验注入系统中提供了手段。

总之,可以概括出如下的看法:

(1) 早期简单系统的发展阶段可概括为以“控制论”为标志,而复杂的系统,体现把专家的知识经验注入系统中的阶段,可概括为以“人工智能”为标志。

(2) 今后系统的发展将是在系统中体现出群体专家知识经验的新时代,其标志是人机结合的大成智慧。

从学科的发展考虑,系统科学与智能科学的研究互相借鉴,找到一个共同点,把两者加以沟通也是势在必行,有利于开拓新的科学领域。

#### 4 “系统复杂性”的研究

从控制系统或者智能系统上升到研究系统的复杂性是很自然的事。关于复杂性(complexity)的研究,在很早的时候



已经就开始了,但用的名字不是“复杂性”而已。人工智能与认知心理学研究的先驱、中科院外籍院士、诺贝尔经济学奖获得者司马贺(H. Simon)早在 1956 年,宣告人工智能(Artificial Intelligence)诞生的 Dartmouth 会议上,曾经提出对这一新兴的学科赋以“复杂信息处理”的名字<sup>[5]</sup>,但最终 J. McCarthy 说服大多数人,接受“人工智能”的名称。后来,1969 年司马贺的专著《人工科学》首次出版。1982 年该书出版了第二版,由武夷山翻译成中文。该书的最后一章题目为“复杂性的构造”(The Architecture of Complexity),作者谈到:在科学和工程中,对系统的研究的活动越来越受到欢迎。它受欢迎的原因,与其说是适应了处理复杂性的知识体系与技术体系的任何大发展的需要,还不如说是它适应了对复杂性进行综合和分析的迫切需要。该书于 1996 年第三版问世时,作者把原来书中最后的第七章改为第八章,新增了题为“对复杂性的各种看法”一章作为第七章。由此可以看出作者对复杂性研究的关注。司马贺还从科学技术发展的角度对近年来与复杂性密切有关的内容作了扼要的概括:第一次世界大战后,爆发了早期的研究,所用的题目是:整体论(holism),经验的整体(gestalts,格式塔),创造性进化(creative evolution);在第二次世界大战后所出现的题目是:信息(information),控制论(cybernetics),一般系统(general systems);当前爆发出的题目是:混沌(chaos),自适应系统(adaptive systems),遗传算法(genetic algorithms)以及元胞自动机(cellular automata)。“系统与复杂性”的研究密切相关的若干课题可归纳如下:

(1) 整体论和还原论(Holism and Reductionism)

(2) 控制论与一般系统论(Cybernetics and General System Theory)

(3) 复杂性方面当前的兴趣(Current Interest in Complexity)

(4) 复杂性与混沌(Complexity and Chaos)

(5) 在突变和混沌世界中的合理性(Rationality in a Catastrophic or Chaotic World)

(6) 复杂性与进化(Complexity and Evolution)

(7) 遗传算法(Genetic Algorithms)

(8) 元胞自动机和生命游戏(Cellular Automata and the Game of Life)

以上是 1996 年司马贺教授所作的归纳。由于复杂性研究在迅速发展,目前人工生命、生物信息学等已成为这一新兴领域中的重要组成部分。国际人工生命(Artificial Life)会议于 2000 年 8 月在美国俄勒冈州的波特兰举行第七届会议就是一个例子。关于什么是复杂性?这位知识广博被誉为“杂家”的司马贺(H. Simon)教授的看法是:复杂性是我们生活的世界,以及与其共栖的系统的关键特征。而我国著名科学家钱学森认为:复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特性。两位的观点颇有相似之处。

### 参考文献:

- [1] 戴汝为. 复杂性研究文集 [C]. 中科院自动化所复杂系统与智能科学实验室, 1999, 5.
- [2] 钱学森. 创建系统学 [M]. 山西: 山西科学技术出版社, 2001.
- [3] 钱学森. 现代科学技术的特点和体系结构 [A]. 王大中, 杨叔子. 技术科学与展望 [C]. 山东: 山东教育出版社, 2002.
- [4] 钱学森著, 何善育, 戴汝为译. 工程控制论 [M]. 北京: 科学出版社, 1958.
- [5] Crevien D. AI: the tumultuous history of the search for artificial intelligence [Z]. BasicBooks, 1993.

## 中科院自动化所系统复杂性研究中心简介

2001 年 12 月 22 日,系统复杂性研究中心在北京中科院自动化所成立。大会由戴汝为院士主持,全国人大常委会副委员长蒋正华,国家自然科学基金委员会副主任周炳琨院士,北京大学杨芙清院士等出席了成立仪式。一直关怀系统复杂性研究的钱学森院士特别委托其助手(钱永刚,涂元季)到会,代表他为中心成立揭幕。

系统复杂性研究是沿着系统科学的思路,基于钱学森院士在上世纪 80 年代末总结和提炼出来的“开放的复杂巨系统”理论及相关方法而发展起来的。《自然杂志》1990 年第 1 期发表了钱学森、于景元、戴汝为合写的一篇论文:《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》,首次向世人公布了这一新的科学领域及其基本观点:对于自然界和人类社会一些极其复杂的事物,从系统学的观点来看,可以用开放的复杂巨系统来描述。1992 年诞生了从定性到定量综合集成研讨厅体系的学术思想。其基本构思是把专家们和知识库信息系统组织起来成为人-机结合的智能系统。

中心在项目上以目前承担的国家自然科学基金重大项目为基础,从经济与社会系统延伸到互联网这一开放的复杂

巨系统。在组织上将联合多个学术研究机构,形成小实体、大网络的虚拟研究中心。目前的参与单位包括中科院自动化研究所、青岛大学复杂性研究所、国家安全部信息安全研究所、首都儿科医学研究所、北京大学国家软件工程中心、中科院过程研究所、中国中医研究院中药研究所等多家机构。中心设立了指导委员会,特邀钱学森院士为总顾问,全国人大常委会副委员长成思危和蒋正华以及多位院士为委员;同时设立学术委员会,由戴汝为院士为主任,多名院士及部分年轻有为的研究人员担任委员。

中心的研究工作目前主要分为两个方向,Internet 动态复杂性研究和中医中药的现代化和复杂性研究。Internet 是一个典型的开放复杂巨系统,其动态行为研究是目前系统复杂性研究的一个热点。而在生命科学与医药科学领域,随着人类基因组测序的基本完成,生物学开始进入系统生物学的时代,人们都认识到需要从系统的角度和整体的角度来认识人体这一开放复杂巨系统。在前不久青岛召开的系统复杂性国际研讨会上,中心采用系统复杂性观点对中医基本理论的研究引起了中医学界的重视和好评。