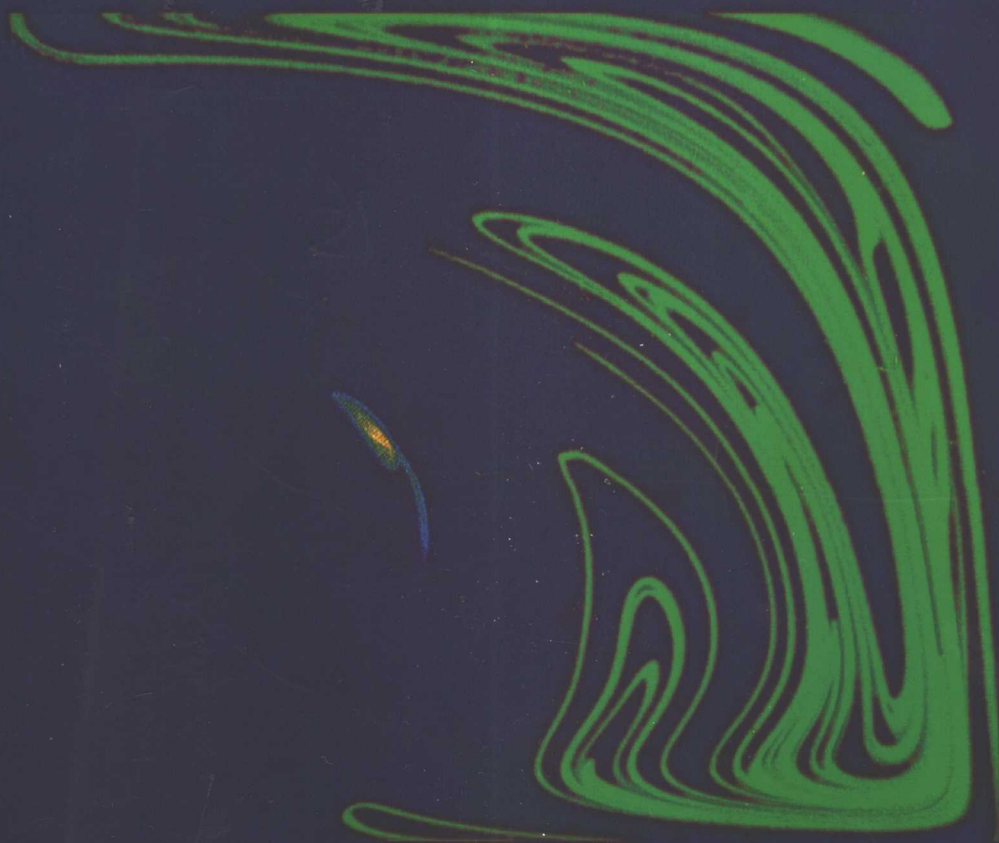


SYSTEMS SCIENCE AND ENGINEERING:
THEORIES AND APPLICATIONS

系统科学与工程研究

主 编 ● 许国志

副主编 ● 顾基发 车宏安



上海科技教育出版社

系统科学与工程研究

主编 许国志

副主编 顾基发 车宏安

上海科技教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

系统科学与工程研究/许国志主编. —上海:上海科技教育出版社,
2000.10

ISBN 7-5428-2430-9

I.系...

II.许...

III.①系统科学-文集 ②系统工程-文集

IV.N94-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 54166 号

责任编辑 潘涛 装帧设计 汤世梁

系统科学与工程研究

主编 许国志

副主编 顾基发 车宏安

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号 邮政编码 200233)

各地新华书店经销 上海新华印刷厂印刷

2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 7-5428-2430-9/N·394

开本 787×1092 1/18 印张 35.5 插页 2 字数 646 000

印数 1-2 000 定价 60.00 元

内容简介

本书旨在总结反映我国二十多年来开展系统科学与工程(系统科学和系统工程)理论研究、应用研究和教学经验,展望系统科学与工程在 21 世纪的进一步发展,是在全国范围公开征文和广泛征求意见的基础上编写的。本书以专题论文形式系统论述了系统科学与工程的基础理论、应用理论和工程应用,系统科学与工程和相关学科的关系,其他学科应用系统科学与工程的理论、方法和技术的经验、体会,以及国际上和我国系统科学与工程研究进展有密切关系的一些系统思想、理论、方法和技术的最新动态。

本书可作为高等院校系统科学、系统工程、管理工程、计算机及相关工程技术、管理类专业的研究生教学用书,亦可作为管理人员、工程技术和科学研究人员、管理干部的高级培训和研究参考书。

本书编写组

戴汝为	成思危	于景元	顾基发	史定华	丁义明	方福康
范文涛	姜璐	吴彤	曾国屏	陈禹	闫学杉	方美琪
谷可	龚小庆	陈泽乾	苗东升	林福永	何敏	车宏安
韩京清	费奇	王红卫	王先甲	陈珽	郑应平	张浩
严隽薇	赵丽娜	秦裕瑗	吴启迪	乔非	王其藩	王浣尘
孙东川	胡保生	汪应洛	李垣	王众托	刘豹	张维
王春峰	汪浩	谭跃进	吴冲锋	冯芸	吴文锋	魏祥云
肖人彬	田大纲	罗明	陈剑	孙国卓	蔡连侨	林嵩
朱岩	罗雪山	韩文秀	金锐	张俊艳	盛昭瀚	蒋德鹏
马军海	党延忠	姚俭	陈增强	袁著祉	李翔	柳克俊
李习彬	张秀媛	申金生	张国伍	贾仁安	涂为员	伍福明
徐南孙	吴澄	李伯虎	王文清	陈万青	黄秉宪	万选才
杨天祝	谭会兵	朱志昌	克劳斯·迈因策尔			

本书评审组

- 于景元 国务院学位委员会委员,国务院学位委员会航空宇航科学与技术学科评议组成员,中国系统工程学会副理事长,中国航天工业总公司 710 所研究员
- 方福康 国务院学位委员会委员,国务院学位委员会系统科学学科评议组召集人,中国系统工程学会系统理论委员会副主任,北京师范大学非平衡系统研究所教授
- 汪应洛 国务院学位委员会管理科学与工程学科评议组召集人,西安交通大学管理学院教授
- 范文涛 中国系统工程学会副理事长、学术工作委员会主任,中国科学院武汉物理与数学研究所研究员
- 戴汝为 中国科学院院士,国务院学位委员会控制科学与工程学科评议组召集人,中国科学院自动化研究所研究员
- 许国志 本书主编,中国工程院院士,中国科学院系统科学研究所研究员
- 顾基发 本书副主编,中国系统工程学会理事长,中国科学院系统科学研究所研究员
- 车宏安 本书副主编,中国系统工程学会教育与普及工作委员会主任,上海理工大学系统工程研究所教授

前 言

在我国开展系统科学和系统工程的研究和应用,以 1978 年钱学森、许国志、王寿云发表“组织管理的技术——系统工程”为标志算起,也已整整 22 年了。20 多年来,在老一辈科学家的领导和推动下,在全国系统科学和系统工程界的努力下,在工程应用和基础理论的研究和推广方面都取得了丰硕成果和经验。在此基础上,许国志在 1998 年 8 月举办的“系统科学与工程研讨班”开幕式上提出编写一本系统科学教材。1998 年 8 月 28 日中国系统工程学会常务理事会议讨论决定,将编写系统科学教材列为学会的工作,由教育与普及工作委员会、系统理论委员会和学术工作委员会具体负责。1998 年 12 月中国系统工程学会在第十届学术年会期间,进一步研究决定,为了更全面地反映 20 多年来的工作,编写两本书:《系统科学》和《系统科学与工程研究》;《系统科学》以成体系的理论框架反映国内共识性的教学和研究成果,《系统科学与工程研究》是专题研究的论述和综述。

为了编写好《系统科学与工程研究》,1999 年 1 月起先后在《系统工程理论与实践》、《系统工程学报》、《系统工程》、《系统工程:理论、方法、应用》等杂志登载了征文通知,尔后又开过几次专门会议,对选题和来稿进行研究。2000 年 2 月 10 日由戴汝为、汪应洛、方福康、于景元、范文涛以及本书的正副主编许国志、顾基发、车宏安组成的评审组对《系统科学》和《系统科学与工程研究》两书的书稿进行了审议。根据评审组的意见,对书稿进行了最后的加工修改。

本书的内容大体分为六个部分:第一部分是“总论”,论述了本学科和部分相关学科的关系,综述了本学科发展的概貌;第二部分是有关系统科学的基础理论(系统理论或系统学)的一些议题;第三部分是相当于系统科学的技术科学层次的一些提炼;第四部分是系统工程方面的成果和经验;第五部分是系统科学与工程在其他学科中的一些运用;第六部分是和我国系统科学和系统工程的发展有关的一些国际学术界的动态。把诸多专题分别归入这些部分不完全贴切,主要是为了使读者阅读方便。

上述内容和具体选题,基本的着眼点是从 21 世纪发展的角度反映过去

20 多年的成果、经验和体会。

在具体内容的取舍编排上,我们力求体现“百花齐放,百家争鸣”的精神,尽量保持文稿的原貌,除对若干专门术语予以统一外,不求风格的一致。

限于时间和篇幅,未能更充分反映有关单位和同志的成果和情况,尚祈鉴谅!在作者和出版社通力支持下,本书即将付梓,对各位作者、上海科技教育出版社、责任编辑潘涛博士,我们表示衷心的感谢!

在本书即将面世之际,我们对所有关心支持本书的编写和出版的同志表示深切谢意!

许国志、顾基发、丰宏安

2000 年 9 月

目 录

前言	1
第一部分 总论	
1 系统科学与复杂性科学	1
戴汝为	
2 复杂科学、系统工程与管理	12
成思危	
3 系统科学与软科学	24
于景元	
第二部分 基础理论	
4 物理—事理—人理(WSR)系统方法论	35
顾基发	
5 系统科学中的密度演化理论	49
史定华	
6 离散动力系统的密度演化方法	62
丁义明 方福康 范文涛	
7 客观世界的自组织	78
姜璐	
8 自组织思想:观念演变、方法和问题	85
吴彤 曾国屏	
9 层次——系统科学的一个重要范畴	100
陈禹	
10 对信息科学发展的一些见解	110
闫学杉	
11 系统科学中的信息概念	120
方美琪	
12 从复杂性研究看非线性科学与系统科学	131
姜璐 谷可	

13	复杂适应系统演化模型的理论框架	142
	龚小庆 范文涛	
14	复杂与混沌分解	153
	陈泽乾 范文涛	
15	系统科学是关于整体涌现性的科学	167
	苗东升	
16	一般系统结构理论	183
	林福永 何敏	
17	关于系统理论发展的几点认识和思考	196
	车宏安	
第三部分 应用理论		
18	控制系统的鲁棒性与哥德尔不完备性定理	211
	韩京清	
19	复杂决策问题的层次性及相应的决策支持技术	224
	费奇 王红卫	
20	决策科学的若干研究进展	238
	王先甲 陈珽	
21	物理/事理过程的理论基础——离散事件动态系统和混杂系统 理论及应用	261
	郑应平 张浩 严隽薇 赵丽娜	
22	初等组合最优化问题的算法的发现	277
	秦裕瑗	
23	复杂系统研究中的多人决策和博弈论方法	294
	郑应平 吴启迪 乔非	
24	系统动力学和复杂大系统综合动态分析与模型体系	309
	王其藩	
第四部分 系统工程		
25	系统科学与系统工程的旋进式三角循环及实践	322
	王浣尘	
26	系统工程若干问题的再认识	330
	孙东川	
27	系统工程专业建设	341

胡保生	
28 战略研究在中国的发展	347
汪应洛 李垣	
29 知识系统工程	358
王众托	
30 金融系统工程:理论与实证	381
刘豹 张维 王春峰	
31 复杂经济系统的空间动态建模方法	394
汪浩 谭跃进	
32 全球经济金融一体化的系统思考	403
吴冲锋 冯芸 吴文锋	
33 DSS 研究中复杂系统决策问题的结构描述与求解	421
费奇 魏祥云 肖人彬 田大纲 罗明	
34 面向复杂问题的决策分析方法研究	433
陈剑 孙国卓 蔡连侨 林嵩 朱岩	
35 基于复杂系统理论的 C ³ I 系统研究	448
罗雪山	
36 复合系统及其协调的一般理论	460
韩文秀 金锐 张俊艳	
37 制度的演化与锁定	471
盛昭瀚 蒋德鹏 马军海	
38 系统结构分析与结构建模新方法	481
党延忠 王众托	
39 自适应模糊系统法若干理论问题的研究及应用	494
姚俭	
40 基于神经网络的非线性系统预测控制研究	506
陈增强 袁著社 李翔	
41 系统工程在指挥控制系统方面的应用	513
柳克俊	
42 社会系统科学的理论体系研究	517
李习彬	
43 交通运输结合部的物理—事理—人理(WSR)系统管理模式	

分析	529
张秀媛 申金生 张国伍	
44 SD 流率基本入树建模法及应用	536
贾仁安 涂为员 伍福明 徐南孙	
第五部分 其他学科的运用	
45 从计算机集成制造到现代集成制造看中国 CIMS 的系统科学	
特点	544
吴澄 李伯虎	
46 系统科学和生命起源	552
王文清 陈万青	
47 脑研究与系统科学	564
黄秉宪	
48 现代层次系统论对脑的认识——泛脑网络学说	581
万选才 杨天祝 谭会兵	
第六部分 国际动态	
49 当代西方系统运动	592
朱志昌	
50 协同学与复杂性——从物理学到全球联网	613
克劳斯·迈因策尔	

系统科学与复杂性科学

戴汝为

中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室

1 前言

近年来,国内外对于复杂性研究的关注程度有所增加。关于复杂性(complexity)的研究,已经在很早的时候就开始了,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),于1969年首次出版了《人工科学》一书。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年出版第三版时,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)。与复杂性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。什么是复杂性?这位知识广博被喻为“杂家”的司马贺教授的看法是: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。

从以上的介绍可以看出,复杂性研究的范围很广,是一门新的科学,牵涉到近些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)的了解,不能对系统的性质作出完全的解释,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质的和,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,几百年以来科技界所用的还原论方法有所不足,还需要补充新的方法。“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,对传统的先严格建立定义再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) 尽量避免对一个名词究竟表达什么含义(即语义)的争论。大部分人对这种争议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了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,复杂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,能否一直到其他领域。这个专辑除了8篇来自不同领域、持不同观点的关于复杂系统的研究报告外,还提供了4份生物科学中的最新报道作为案例分析,这对复杂性的研究将会起到积极的参考作用。

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有大量活的、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,而整个系统及子系统又与环境之间有交互作用。这样的系统称为“开放的复杂巨系统”(Open Complex Giant Systems)。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,开放的复杂巨系统问题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。

一种新的科学思想的形成,一门新科学的发展,往往需要经历一个曲折而艰苦的过程。90年代初,有关复杂性的研究与探讨,曾经引起我国一些科技人员的关注,1991年1月,在中科院张焘等同志的倡议下,并得到一批老科学家的热情支持,由周光召院长主持,举行过一次“复杂性科学学术讨论会”。由于当时对国内所提出的“开放的复杂巨系统”以及美国圣菲研究所(SFI)的一些研究与结果等情况不够了解,关于这一新兴学科尚属于众说纷纭的状况,有关方面对这一领域的发展未采取积极的措施。后来通过

讨论交叉学科的发展,引起大家很大的兴趣。经过几年的探索后,对复杂性的研究有了明显的进展。1994年9月进行过一次题为“开放复杂巨系统方法论”的“香山会议”。1997年1月举行了“开放的复杂巨系统的理论与实践”的第68次“香山会议”,这三次会议对推动复杂性的研究,起到了积极的作用。近两年,复杂性的研究有了较大进展。1999年3月又举行了一次“复杂性科学”为题的“香山会议”,国家自然科学基金委于1999年8月举行“学科前沿与国家自然科学基金优先资助领域战略国际研讨会”上把“复杂系统与复杂性科学”列为第十个“五年”计划优先资助的项目之一,为这个新的、综合性科学的发展给予了必要的支持。

2 国外复杂性科学研究的前沿阵地——SFI

下面我们先介绍一点国外的研究情况。当前国外关于复杂性科学的研究有不少单位在进行。以美国为例,在MIT,洛斯阿拉莫斯国家实验室,乔治·梅森大学都有人从事这方面的研究。这些单位中,以圣菲研究所(Santa Fe Institute)的工作影响最大。20世纪80年代,在美国新墨西哥州,洛斯阿拉莫斯国家实验室(这个实验室在第二次世界大战中,汇聚了一批著名的物理学家,研制原子弹而闻名于世)的几位元老,不满足于当时进行跨学科研究的条件的局限性,于1984年在该实验室附近34英里的圣菲(Santa Fe),筹建一个圣菲研究所。他们先后邀请了三位诺贝尔奖获得者:夸克理论的创始人,加州理工学院的Murray Gell-Mann、斯坦福大学的经济学家Kenneth J. Arrow以及普林斯顿大学凝聚态物理学家Philip W. Anderson和一些年轻的科学家,形成了年轻的科学家可以和世界级的大师携手合作的局面,聚集了一批不同领域(生物学、经济学、计算机科学、物理学、数学、哲学等领域)的科学家,他们热衷于不同学科之间的深入与互相影响,以短期合作的方式在SFI安排了经济、物理、生物、计算机、考古、政治学、人类学等领域中的学者的对话与研讨,试图在各种不同的复杂系统之间找出一些共性^[1~2]。SFI的科学家们摆脱一些学科固有观念的束缚,探索未知的新天地,进行一场跨学科、学科的大整合,致力于他们称之为复杂性科学的开创,虽然该所是个比较松散的机构,但所进行的科学发展模式是史无前例的。

关于复杂性科学的一些来龙去脉,SFI的首任所长考恩(George A. Cowan, 费米奖的获得者)在1994年SFI举行的一次学术会议的开幕式上作过简要的叙述^[2]:复杂性作为一门科学,及现代唤醒复杂性兴趣的起源地是维也

纳。1928年贝塔朗菲(von Bertalanffy)完成描述生物有机体系统的毕业论文。在此之前的若干年,怀特海(Alfred North Whitehead)在《科学与现代世界》上以“有机体的哲学”一文,描述了相类似的见解。自此以后的20年,在这方面通过发表著作,做出实质性贡献的人和著作有:麦卡洛克(McCulloch)和皮茨(Pitts)的神经网络(neural network)、冯·诺伊曼的元胞自动机(cellular automata)和复杂性(complexity)、以及维纳(N. Wiener)的控制论(Cybernetics)。到了50年代以后,尽管普里高津(Prigogine)及哈肯(Haken)做出过重要的贡献,关于复杂性的兴趣、研究与进展,看来极为缓慢。从90年代开始,SFI致力于复杂性科学的各有关部分的工作。现在复杂性科学被称为21世纪的科学,它已经在多个领域中成为人们关心的问题。考恩甚至认为Santa Fe是一个使命,是一个为整个科学界获得拯救和新生的契机。

考恩对复杂性研究发展的来龙去脉的叙述,也可以说是系统科学发展的一条粗线条;Bertalanffy、Wiener、Prigogine及Haken都是系统科学的先驱者。由于跨学科研究的趋势越来越明显,到了90年代,通过SFI以及国内外众多科学家们的努力,使得在系统科学的框架上进一步发展了复杂性问题变得清晰,而且变得丰富多彩。他的看法与前面所说的司马贺的看法是吻合的。

3 开放的复杂巨系统的动力学特性——复杂性

在我国,由于国内广大科技人员的协同劳动,著名科学家钱学森于1981年提出三个崭新的科学技术大部门:系统科学、思维科学和人体科学。他认为推动系统科学研究的是现代化组织管理的需要,推动思维科学研究的是计算机技术革命的需要,推动人体科学研究的是开发人的潜力的需要。他在北京领导了系统科学、人体科学和思维科学三个讨论班,并总结出现代科学技术体系和知识体系,打破了已有学科之间人为的壁垒,使之成为一个内在统一、相互关联并相互促进的一个整体。在最近15年期间他对这三个领域作出了大量创新的工作,对系统科学进行了开拓,提炼出“开放的复杂巨系统”及处理这类系统的、超越还原论的方法。1990年《自然杂志》第1期发表钱学森、于景元、戴汝为三人署名的一篇文章“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”^[3],首次向世人公布了这一新的科学领域及其基本观点,它是在钱学森领导的持续多年的系统学讨论班上,用系统的观点研究了范围广泛的横跨自然科学和社会科学的问题后,从中提炼出来的。