

复杂科学与系统工程

成思危

(国家自然科学基金委员会管理科学部)

自从贝塔朗菲(Ludwig von Bertalanffy)于本世纪40年代提出一般系统论的概念以来,系统科学得到了迅速的发展,其主要成就之一就是系统工程的广泛应用。系统工程的作用就是按照系统科学的原理来设计并构建或改造一个系统,使其具有预期的功能。而国外在80年代又提出了复杂科学的概念,它主要是研究复杂性和复杂系统的科学,目前虽还处于萌芽状态,但已被有些科学家誉为“21世纪的科学”。笔者认为,复杂科学是系统科学发展的新阶段,它必然会对系统工程的发展起着十分重大的影响,本文拟结合国内外的情况就此进行一些初步的探讨。

1 系统工程在中国的演进

中国古代思维的特点之一就是整体思维,即着重从整体上把握事物的特性和功能。例如《易经》中的阴阳、八卦学说,《尚书》中的五行学说,中医的辩证施治理论,《孙子兵法》中的战略思想,《吕氏春秋》中的天地人合一说,等等。在这些思想的指导下出现了中国古代光辉灿烂的文化、科技和工程成果,例如诸子百家、天文历法、火药、印刷、万里长城、大运河、都江堰和灵渠等。

系统工程在当代中国的发展的历程可大体上分为以下3个阶段。

第1阶段起始于50年代中期,以运筹学的研究与应用为主,当时刚由美国回来的钱学森、许国志等学者大力提倡运筹学,著名数学家华罗庚致力于发展优选法与统筹法,都取得了较好的效果。60年代随着我国导弹和航天事业的发展,以计划协调、组织管理为特色的系统工程技术得到迅速的发展。到70年代中期,我国在运筹学的各个主要学术分支上都已建立了一定的基础。

第2阶段起始于1978年,钱学森、许国志及王寿云联名在《文汇报》上发表了题为“组织管理的技术——系统工程”一文,在全国掀起了学习研究并推广应用系统工程的热潮。在最优化方法、图论、排队论、对策论、可靠性分析等一批系统工程

方法得到普及应用并取得显著效果的同时,投入产出分析、工程经济、预测技术、价值工程等许多方法和技术也得到普及和发展,中国系统工程学会也于1980年正式成立。

第3阶段起始于1986年,随着全国软科学研究工作座谈会的召开,系统工程的研究和应用进一步扩大至科技、经济及社会等领域。钱学森在那次座谈会上指出,软科学是新兴的科学技术,实际上是系统科学的应用。近年来,为了适应决策科学化的需求,一批软科学研究机构应运而生,在经济及科技体制改革、宏观经济管理、人口、环境、能源、工业、农业、交通运输、金融等方面都取得了一些较好的成果,中国软科学研究会也于1994年宣告成立。

笔者认为,中国系统工程发展的趋向应当是将我国古代的系统思想与现代系统科学结合起来,进一步发展系统工程的方法与技术,以便有效地解决复杂系统的分析和综合问题。

2 复杂科学是系统科学发展的新阶段

随着科学的发展和技术的进步,系统科学从本世纪30年代开始兴起,人们逐渐认识到系统大于其组成部分之和,系统具有层次结构和功能结

构,系统处于不断地发展变化之中,系统经常与其环境(外界)有物质、能量和信息的交换,系统在远离平衡的状态下也可以稳定(自组织),确定性的系统有其内在的随机性(混沌),而随机性的系统却又有其内在的确定性(突现)。这些新的发现不断地冲击着经典科学的传统观念。系统论、信息论、控制论、相变论(主要研究平衡结构的形成与演化)、耗散结构论(主要研究非平衡相变与自组织)、突变论(主要研究连续过程引起的不连续结果)、协同论(主要研究系统演化与自组织)、混沌论(主要研究确定性系统的内在随机性)、超循环论(主要研究在生命系统演化行为基础上的自组织理论)等新科学理论也相继诞生。这种趋势使许多科学家感到困惑,也促使一些有远见的科学家开始思考并探索新的道路。复杂系统和系统的复杂性这两个范畴就是在这样的背景下提出的。

根据笔者的理解,可以认为系统的复杂性主要表现在以下几个方面:

- 1) 系统各单元之间的联系广泛而紧密,构成一个网络。因此每一单元的变化都会受到其它单元变化的影响,并会引起其它单元的变化。
- 2) 系统具有多层次、多功能的结构,每一层次均成为构筑其上一层次的单元,同时也有助于系统的某一功能的实现。
- 3) 系统在发展过程中能够不断地学习并对其进行层次结构与功能结构进行重组及完善。
- 4) 系统是开放的,它与环境有密切的联系,能与环境相互作用,并能不断向更好地适应环境的方向发展变化。
- 5) 系统是动态的,它不断处于发展变化之中,而且系统本身对未来的发展变化有一定的预测能力。

关于复杂系统,许多科学家提出了种种不同的定义,有人认为是组分众多具有层次结构的系统,有人认为是具有多样性的系统,也有人认为是耦合度高的系统,还有人认为是有人参与的系统,等等。笔者认为,复杂系统最本质的特征是其组分具有某种程度的智能,即具有了解其所处的环境,预测其变化,并按预定目标采取行动的能力。这也就是生物进化、技术革新、经济发展及社会进步的内在原因。

根据上述理解,笔者认为复杂科学有以下 3

个主要特点:

- 1) 其研究对象是复杂系统,例如植物、动物、人体、生命、生态、企业、市场、经济、社会、政治等方面的系统,还可以包括物理、化学(例如择形催化)、天文、气象等方面具有复杂性的系统。
- 2) 其研究方法是定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、还原论与整体论相结合、科学推理与哲学思辩相结合的方法。其所用的工具包括数学、计算机模拟、形式逻辑、后现代主义分析、语义学、符号学,等等。
- 3) 其研究深度不限于对客观事物的描述,而是更着重于揭示客观事物构成的原因及其演化的历程,并力图尽可能准确地预测其未来的发展。例如为什么一个受精卵能演化成具有脑、眼、口、鼻、心、肺、肝、肾等等器官的人体?为什么处于大体相同的客观环境中的企业有成有败?为什么世界各国之间贫富相差悬殊?这种差距将来会有所缩小还是会继续扩大?等等。

面临新的世纪,系统工程应朝什么方向演进,这是许多学者都在关心和探讨的问题。笔者认为,人类文明从工业-机械文明向信息-生态文明的大转变必然伴随着科学的大转折。而以还原论、经验论及“纯科学”为基础的经典科学正在吸收系统论、理性论和人文精神而发展成为新的科学——复杂科学。因此,复杂科学将是系统科学发展的新阶段,也是系统工程今后演进的方向。

3 复杂科学的发展与现状

关于复杂科学的研究一般认为是在 80 年代中期开始的。1984 年,在诺贝尔物理学奖获得者盖尔曼(Murray Gell-Mann)和安德逊(Philip Anderson)、经济学奖获得者阿若(Kenneth Arrow)等人的支持下,聚集了一批从事物理、经济、理论生物、计算机等学科的研究人员,组织了桑塔费研究所(Santa Fe Institute, SFI),专门从事复杂科学的研究,试图由此找到一条通过学科间的融合来解决复杂性问题的道路。在此前后,还有一些学者在进行复杂性与复杂系统方面的探索。据乔治·梅森大学(George Mason University)的沃菲尔德(John Warfield)教授的介绍,目前仅在美国就已形成了 5 个学派。其主要学术观点及研究

方向如下:

学派名称	代表人物	理论工具	复杂性所在	主要研究方向
系统动力学学派	Forrester, Meadows, Senge 等以 MIT 为基地的学者	常微分方程	系统中	组织理论, 特别是学习型组织
适应性系统学派	Cowen, Kauffman, Holland, Arthur, Casti 等以 SFI 为基地的学者	偏微分方程	系统中	经济、生物、认知等系统
混沌学派	一些分散的小组, 例如 Los Alamos 非线性研究中心	非线性常微分方程	系统中	物理、经济等系统
结构基础学派	Warfield, Vickers, Piece, Polanyi, Piaget 等人	西方形式逻辑, 包括集合论, 关系论, 图论, 点阵论, 布尔方法, 分叉代数等	人脑中	管理理论, 特别是交互式管理
暧昧学派	一些独立研究的学者	学科交叉及(或)后现代主义方法	不明确	社会、科学、语言等系统

美国的复杂科学研究者相当重视在经济和管理方面的应用, 比较著名的著作有沃菲尔德的《交互式管理》(Interactive Management), 盛治(Peter Senge)的《第五项修炼》(The Fifth Discipline), 阿瑟(Brian Arthur)的《经济中的递增回报与路径依存》(Increasing Return and Path Dependence in the Economy)等。

近两年来, 一些以复杂科学方法及其在管理中的应用为基础的咨询公司也开始诞生, 例如知识基础发展公司(Knowledge Based Development Ltd, KBD), 复杂性解答公司(Complexity Solutions Ltd, CSL), 桑塔费突现战略中心(The Santa Fe Center for Emergent Strategy), 社区智能实验室(Community Intelligence Labs), KBD-Lavoie 公司等。个别商业化的软件也已有出售, 例如 M(交互式管理软件), ISM(解释性结构化建模软件)等。

KBD 公司每季度在伦敦举办一次复杂性论坛, 每次三天。其论题包括: 突现的设计; 复杂性理论的应用; 复杂性与技术; 创新的组织; 组织设计等。讨论的核心问题包括: 什么是复杂性的适当的业务形式以及它们如何与新兴的技术相联系? 它们对组织的创新能力有何影响? 公司的生产率与创新如何关联? 公司在信息时代如何学习成长并迅速适应? 等等。

我国学者钱学森等于 1990 年提出了开放的复杂巨系统的概念, 并认为复杂性问题实际上是

开放复杂巨系统的动力学特性问题。1992 年他们又提出从定性到定量综合集成研讨厅体系, 实现人机结合的大成智慧。遗憾的是, 由于种种原因, 这些想法一直未能得到实践的机会, 因此还没有取得实际的成果。

4 复杂科学的基本方法与主要工具

笔者认为, 研究复杂系统的基本方法应当是在唯物辩证法指导下的系统科学方法。它包括以下 4 个方面的结合。

1) 定性判断与定量计算相结合

通过定性判断建立系统总体及各子系统的概念模型, 并尽可能将它们转化为数学模型, 经求解或模拟后得出定量的结论, 再对这些结论进行定性归纳, 以取得认识上的飞跃, 形成解决问题的建议

2) 微观分析与宏观综合相结合

微观分析的目的是了解系统的组元及其层次结构, 而宏观综合的目的则是了解系统的功能结构及其形成过程。

3) 还原论与整体论相结合

还原论强调从局部机制和微观结构中寻求对宏观现象的说明, 例如用物理—化学规律来说明生物学现象, 这显然是片面的。而整体论则强调系统内部各部分之间的相互联系和作用决定着系统的宏观性质, 但如果没有对局部机制和微观结构

的深刻了解,对系统整体的把握也难以具体化。复杂科学正是在深入了解系统个体的性质和行为的基础上,从个体之间的相互联系和作用中发现系统的整体性质和行为。

4) 科学推理与哲学思辩相结合

科学理论是具有某种逻辑结构并经过一定实验检验的概念系统,科学家在表述科学理论时总是力求达到符号化和形式化,使之成为严密的公理化体系。但是,科学的发展往往证明任何理论都不是天衣无缝的,总有一些“反常”的现象和事件出现。这时就必须运用哲学思辩的力量,从个别和一般、必然性和偶然性等范畴,以及对立统一、否定之否定等规律来加以解释。

目前复杂科学研究中所用的理论工具主要是微分方程和形式逻辑,今后似应努力掌握以下一些工具。

1) 在不确定条件下的决策技术

包括定性变量的量化(多维尺度、广义量化等),经验概率的确定(数据挖掘、数据库中的知识发现、智能挖掘等),主观概率的改进,案例研究与先验信息的集成等。

2) 综合集成技术

包括系统的结构化,系统与环境的集成(全局和局部),人的经验与数据的集成,通过模型的集成,从定性到定量的综合集成等。

3) 整体优化技术

包括目标群及其优先顺序的确定,巨系统的优化策略(分隔断裂法、面向方程法、多层迭代法、并行搜索法等),优化算法(线性规划、目标规划等),离线优化与在线优化,最优解与满意解的取得等。

4) 计算智能

包括演化计算(例如遗传算法、演化策略、演化规划、遗传程序设计等),人工神经网络(例如EBP型、竞争型、自适应共振型、联想记忆型,等等),模糊系统等。

5) 非线性科学

美国罗萨拉莫斯(Los Alamos)国家实验室非线性研究中心是非线性科学的发源地和权威单位,他们认为非线性科学已由传统的动力系统理论(稳定性和分叉理论,混沌,孤子)和统计力学(分形,标度),延伸到多尺度、多体,以及非平衡系

统中的复杂和随机现象的研究。而对非线性科学的压倒一切的挑战就是:对远离平衡的多体系统中的自组织结构的形成和功能,确认其关键的范式。

6) 数理逻辑

即数学化的形式逻辑,包括经典谓词逻辑,广义数理逻辑(例如模型论、公理集合论、证明论、递归论等),多值逻辑,模态逻辑,归纳逻辑等。

7) 计算机模拟

它是十分重要的手段,目前已广泛用于复杂科学的研究中。其中比较著名的有人工生命(Artificial Life),元胞自动机(Cellular Automata),竞争与合作(Co-opetition),大群模拟工具(Swam Simulation Toolkit)等。

5 复杂科学在管理中的应用前景

复杂系统的范围很广,涉及工程、生物、经济、管理、军事、政治、社会等各个方面。对复杂系统的研究将有助于人们了解其发展规律及动因,以便更好地进行适应与调控。一些学者运用复杂科学研究企业管理与宏观经济管理问题,从新的视角出发进行思考,已提出了一些颇有新意的观点,现举例概述如下。

1) 群体决策

在社会、经济、科技迅速发展的今天,决策者面临着错综复杂、瞬息万变的环境,要想尽可能作出正确的决策,除了改进决策技术之外,还必须依靠群体的智慧。但是由于决策群体中各人的知识、经验、胆略、利益、价值观等方面都有所不同,以及局部利益与全局利益的矛盾,还需要用适当的方法进行协调与妥协。这时可以采用对策论的方法,求出合作对策的妥协值。但这时应注意使群体中的各成员充分了解该决策的价值体系及有关的各种信息。而妥协值的形成是群体中各成员之间反复交换意见的结果,而不是各成员意见的简单线性迭加。还要尽量防止由于决策群体中各成员的影响力不同所造成的妥协值的漂移。在通过群决策实现综合集成时,如何具体贯彻“在民主基础上的集中,在集中指导下的民主”这一民主集中制的原则,还应当进一步探索研究。

2) 技术创新

在从工业社会向信息社会转变的过程中, 企业没有创新就难以生存。复杂科学将创新看作是已有的知识和组元重新组合而造成的突出现象。复杂科学反映着在科学和商务上做事方法的根本转变, 企业必须把开发知识和智能放在首位。复杂科学家研究了如何通过企业职工(组元)之间的相互作用而产生知识、创新、创造性和智能, 发现创新的产生主要取决于组织与激励, 创造让全体职工通过联系与交流关心企业全局的条件, 而不取决于个别职工突出的聪明才智。正如中国谚语所说: “三个臭皮匠, 赛过诸葛亮。”创新并不是个别天才人物的灵机一动, 而是系统为适应环境变化所作出的调整。

3) 企业组织

随着复杂科学的发展, 更加强调组织的进化性和应变能力。一个组织要想在错综复杂、瞬息万变的环境下生存和发展, 就必须能够从外部准确而及时地获取信息, 迅速调整自己的内部结构以适应环境的变化。因此, 在组织方式上提出了无固定边界的非正规组织、层次很少的扁平型组织、成员之间能有效沟通的网络状组织、有利于鼓励内部创新的半自治式组织, 等等。在盛治所著的《第五项修炼》一书中, 强调组织素质是一个组织的根本优势之所在, 而组织素质的培养和提高则要靠不断的修炼, 即要成为一个学习型的组织。组织是一个动态的、复杂的系统, 需要用系统的观点对其进行分析和思考。在把握自我、改善思维、共享未来、合作共事的基础上加上系统思考, 这就是学习型组织修炼的核心。上述观点既反映在一些学者的著作中, 例如彼得斯(Tom Peters)所著的《在混沌中茁壮成长》(Thriving on Chaos)与《自由化管理》(Liberation Management); 也受到一些知名企业家的赞同, 例如 Intel 公司前总裁格罗夫(Andrew S. Grove)就在其所著的《只有妄想者才能生存》(Only the Paranoid Survive)一书中就强调要能够在多变的环境下及时进行大胆的战略调整, 既要受混沌的引导, 又要能驾驭混沌, 才能把握好战略的转折点而度过危机。

4) 经济发展

复杂科学对传统的经济学理论提出了挑战, 它不再将经济看成是市场稳定和供求均衡的结果, 而看成是由许多相互作用的个体在不稳定的

状况下彼此不断调整关系的结果。每个个体都根据它对未来的预测及其他个体的反应来采取行动, 并且在不断地学习和适应。由此会突现出新的经济结构和模式, 而组成经济的机构、行为及技术等因素也会不断地形成和重组。经济的某些部分可能会达到暂时的平衡, 而另一些部分则可能会不断地演化。

复杂科学对传统经济学挑战是从阿瑟在一些日常经济现象中发现递增回报开始的, 他提出由于递增回报的存在, 造成了高技术企业集中在硅谷、VHS 录像带战胜了 Beta 录像带、QWERTY 键盘的独占市场等等特有的形式和可能性。因此建立在均衡、稳定、决定性等物理学理论基础上的旧经济学应当被建立在结构、特有形式、自组织、生命周期等生物学理论基础上的新经济学所取代。阿瑟还提出经济发展是路径依存的, 就像下棋一样, 当采取了某一步骤之后, 就会影响到以后所采取的若干步骤及其后果。目前杜尔劳夫(Steven Durlauf)等人正在桑塔费研究所建立一个庞大的模型, 包括教育程度和种族等特性不同的个人和家庭、社区、学校、工作单位、少数民族团体等群体, 以及这些组元的决策规则和它们之间各种相互作用的规则, 希望能通过计算机模拟来发现某些整体的规律, 以及政府经济政策改变所引起的后果。经过多次认真的论证, 国家自然科学基金委员会管理科学部已确定将《支持宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究》列为重大项目予以支持, 预计可在 3-5 年内取得一些成果。

5) 金融危机

近年来, 国内外学者对金融危机进行了大量的研究, 据不完全统计, 至今所发表的文章已达 3000 篇以上。笔者在指导《东亚金融危机的分析与启示》课题的研究中, 曾运用系统论与复杂科学的方法对此进行过一些初步的探索, 认为金融危机产生的深层次原因是虚拟经济系统的崩溃。

虚拟经济(Fictitious Economy)是指证券、期货、期权等虚拟资本的交易活动。其发展过程包括闲置货币的资本化、生息资本的社会化、有价证券的市场化、金融市场的国际化以及国际金融的集成化等阶段, 1997 年其世界总量已达 140 万亿美元, 约为世界各国国内生产总值总和(28.2 万亿美元)的 4 倍。全世界虚拟资本每天的平均流动量

已高达 1.5 万亿美元以上。可以预计,随着电子商务和电子货币的发展,虚拟经济的规模还会膨胀。

虚拟经济系统的主要特点是:

复杂性:投资者、受资者,以及金融中介者虽然都有独立进行决策的自由,但每个人的决策又不能不受到其他人的决策的影响。

介稳性:远离平衡状态,但却能与外界进行物质和能量的交换而维持相对稳定,即具有耗散结构。这种系统虽能通过自组织作用而达到稳定,但其稳定性很容易被外界的微小扰动所破坏。这是由虚拟资本的内在不稳定性所造成的。

高风险性:虚拟资本的内在不稳定性导致其价格变幻无常,而金融市场交易规模的增大和交易品种的增多使其变得更为复杂。人们对市场及环境变化的预测能力不足,其中不少人承受风险的能力有限,均会增加虚拟经济系统的不稳定性。由于许多人因追求高收益而甘冒高风险,从而促使各种高风险、高回报的金融创新不断出现,例如利率期货、股票指数期货、物价指数期货及期权等。

寄生性:它是由实体经济系统中产生,又依附于实体经济系统的。在实体经济系统中产生的风险,都会传递到虚拟经济系统中,导致其失稳。而虚拟经济系统中的风险,也会对实体经济造成严重的影响。在金融已成为经济核心的今天,实体经济已不可能脱离虚拟经济系统而运行。因此,如果将实体经济系统看成是经济系统中的硬件,则可认为虚拟经济系统是经济系统中的软件。

周期性:一般包括实体经济加速增长、经济泡沫开始形成、货币与信用逐步膨胀、各种资产价格普遍上扬、乐观情绪四处洋溢、股价与房地产价格不断上升、外部扰动造成经济泡沫破灭、各种金融指标急剧下降、人们纷纷抛售实际资产及金融资产、实体经济减速或负增长等阶段。

金融危机是指利率、汇率、股价等金融指标全部或大部突然而急剧地恶化的现象,这时人们纷纷抛售其实际资产并变现其虚拟资本,导致经济及社会的动荡。从系统论的角度看来,可以认为金融危机的成因主要是基于虚拟经济系统的内在特性,加上来自外界的扰动,从而造成虚拟经济系统的崩溃。

此外,复杂科学在防灾减灾、战略管理、合作

一竞争等方面都有一些创新,本文中不再详述。

6 努力学习和创新,发展我国的复杂科学

笔者认为对国外提出的一些新观念,首先要有高度的敏感性,但不要赶时髦;其次是要认真研究其特征和提出的背景;三是应结合我国的现状进行思考,提出对策;四是要提倡百家争鸣,发扬学术民主,各抒己见,求同存异,通过实践来逐渐求得一致。

为了在我国开拓复杂科学的研究,根据笔者的建议组织召开了第 112 次香山科学会议,旨在探讨在我国开展复杂科学的方向及重点,并在此基础上确定支持一些科学家进行探索。会后国家自然科学基金委员会管理科学部迅即着手组织制定和实施发展我国复杂科学的计划,预计近期内可发布项目申请指南。从我国的现实需要出发,可以考虑先由经济与管理方面的问题入手,例如某些改革措施对经济系统运行的影响,以及小概率、大影响的事件(如金融危机,自然灾害等)的发生条件及预警手段等。此外,生物复杂性及其对经济及社会发展的启示也应受到重视。

在已经立项的一些重大及重点项目中,应尽可能鼓励科学家们注意学习和运用复杂科学的方法。应注意选派优秀学者到桑塔费研究所及乔治—梅森大学等单位进行合作研究,还应组织人员准备参加在英国举行的复杂性论坛。此外,笔者感到桑塔费研究所的组织形式很有特点,其专职人员只有正副所长和秘书(约 20 人),其研究人员主要在各自的单位进行研究,只是短期到所内工作或参加讨论会。其学术环境十分宽松,有利于发展前沿学科,进行学科融合的研究。建议在国内选择适当的单位,筹办类似“虚拟研究所”的“复杂科学研究中心”,对复杂科学进行自由的学术探索。针对我国改革与发展中的重大问题,逐步建设定性与定量相结合的综合集成政策研讨厅。

从科学哲学的观点看来,可以认为复杂科学的出现意味着向唯物辩证法的回归及螺旋式推进。事物普遍联系、对立统一、从量变到质变、否定之否定等观念已被赋予更丰富的内涵,并可初步

用定性与定量相结合的方法来分析和描述。因此, 哲学高度并有远见卓识的科学家, 为我国下世纪要加强自然科学家与社会科学家之间的沟通与合作, 促进科学的融合, 培养有专业深度、学科广度、复杂科学的发展创造有利的条件。

参考文献

- 1 Axelrod R M. The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration. Princeton Univ. Press, 1997
- 2 Bak P. How nature works: the science of self-organized criticality. Springer Verlag, 1996
- 3 Casti J L. Complexification: explaining a paradoxical world through the science of surprise. Harperperennial Library, 1995
- 4 Casti J L. Five golden rules: great theories of 20th century mathematics and why they matter. Wiley, 1995
- 5 成思危. 试论科学的融合. 自然辩证法研究, 1998, (1)
- 6 成思危. 管理科学的现状与展望. 管理科学学报, 1998; 1(1): 8~ 14
- 7 成思危. 虚拟经济与金融危机. 管理科学学报, 1999; 2(1): 1~ 6
- 8 Cilliers P. Complexity and postmodernism: understanding complex systems. Routledge, 1998
- 9 Cohen B. The edge of chaos: financial booms, bubbles, crashes and chaos. Wiley, 1997
- 10 Coveney P. Frontiers of complexity: the search for order in a chaotic world. Fawcett Books, 1995
- 11 Holland J H. Hidden order: how adaptation builds complexity. Addison-Wesley Pub. Co., 1996
- 12 Johnson G. Fire in the mind: science, faith, and the search for order. Vintage Books, 1996
- 13 Kauffman S. At home in the universe: the search for laws of self-organization and complexity. Oxford Univ. Press, 1996
- 14 Langton C G. (Editor) Artificial life: an overview (Complex Adaptive Systems). Bradford Books, 1997
- 15 刘骏民. 从虚拟资本到虚拟经济. 山东人民出版社, 1998
- 16 MCMaster M D. The intelligence advantage: organizing for complexity. Butterworth-Heinemann, 1996
- 17 马克思. 资本论. 中译本, 北京: 人民出版社, 1975, 3: 525~ 670
- 18 Mitchell M. An introduction to genetic algorithms. MIT Press, 1998
- 19 Peters E E. Chaos and order in the capital markets. 2nd Ed., Wiley, 1996
- 20 Waldrop M M. Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos. Touchstone Books, 1993
- 21 Wolfram S. Cellular automata and complexity. Perseus Press, 1994

【附注】本文系作者在 1998 年 8 月 25 日在《国际系统科学与系统工程会议》开幕式上所作的主题报告——“Complexity Science and Systems Engineering”及 1999 年 3 月 18 日在以“复杂性科学”为研讨主题的第 112 次香山科学会议开幕式上所作的主题报告——“复杂科学与管理”的基础上综合而写成。