

# 复杂性研究与系统科学

于景元, 刘毅

(中国航天科技集团公司 710 研究所, 北京 100037)

**摘 要:** 本文首先介绍了复杂性研究的科学背景及其科学启示, 然后把复杂性和复杂系统结合起来, 从系统科学角度研究复杂性问题, 阐述了研究复杂系统的方法论——钱学森的从定性到定量综合集成方法。

**关键词:** 复杂性; 系统科学

**中图分类号:** N94

**文献标识码:** A

现代科学技术的发展已经取得了巨大成就, 今天人类正探索从渺观、微观、宏观、宇观直到胀观五个层次时空范围的客观世界。其中宏观层次就是我们所在地球, 在地球上又诞生了生命、生物, 出现了人类和人类社会。

物理学的发展, 已取得了巨大成就; 在物质结构上, 已经到了夸克层次, 正在研究的超弦也许有可能把四种力统一起来; 宇宙的起源, 提出了大爆炸理论 (Big Bang); 生命的起源, 分子生物学已到了基因层次; 人的智能形成, 脑科学、思维科学, 都有了很大进展; 人类社会的发展, 认识到了可持续发展的重大意义。科学的发展, 还可以继续这样走下去, 还会取得新的成就, 但有没有值得反思的问题呢?

## 1 科学背景

诺贝尔奖获得者李政道<sup>[1]</sup>在 2000 年“科学世界”的前沿学科热点话题卷首语中写道:“总结 20 世纪物理学的发展, 可以简单地说, 它着重简化、归纳。另外, 我们相信找到了最基本的粒子, 就会了解大物质的构造, 这个方向使我们获得很大的成功。可是, 到 20 世纪中叶, 我们发现不是光知道基本粒子就能完全了解整个宇宙的大问题, 对称与不对称的矛盾, 看不见的夸克、暗物质、类星体都在基本粒子之外。我猜想 21 世纪的方向要整体统一, 微观的基本粒子要和宏观的真空构造, 大型的量子态都结合起来, 这些很可能是 21 世纪的研究目标。”“21 世纪开始时,

物理学至少和生物学一样重要。因为 21 世纪一个重要问题是要把微观跟宏观联合起来, 这里所需要的科学方法很可能是首先由物理界创新, 生物学逐渐地跟过来的。生物学界研究基因的思想是跟随 20 世纪物理学简化归纳方向的: 大的是小的组成的, 小的是更小的组成的, 思想是相似的。现在我们发现所有的物质是由 6 个夸克、6 个轻子组成, 这是 20 世纪的大发现。那么生物学在 20 世纪中叶时, 在这个方向上也取得了很大的成功, 发现了 DNA、RNA、基因……生物学领域势必也要走这条路 (指微观和宏观联合起来), 因为全部的基因并不是生命, 生命是宏观的, 人们也要把微观跟宏观联合起来……。”李政道先生在新世纪到来之际, 对科学发展的深刻见解, 具有重大科学意义。

1999 年美国 Science 杂志, 刊登了一组文章, 专辑标题为“Complex System”, 两位编者 R. Gallaght 和 T. Appenzeller 写了个前言, 题目是“超越还原论”。他们写道:“物理化学中的总是可以根据原子物理学来理解, 细胞生物学根据原生质如何起作用, 生物体根据构成它们的细胞系统相互作用。我们有采取这种还原论的最好理由——它有效。自从西方科学的黎明以来, 它就是获得有用信息的关键, 而且已通过科学家及其他深深地植入我们的文化之中。”同时该文也指出“但是还原论的不足之处正日益明显……至少越来越专业化的学科分支正在为信息流动制造障碍。另一个问题是过分简化。”这个专辑分别就化学、生物学、神经学、动物学、自然地理、气候学、经济

收稿日期: 2002-07-31

作者简介: 于景元 (1937—), 男, 黑龙江人, 研究员, 研究方向为系统工程与系统科学。

刘毅 (1963—), 男, 四川人, 研究员, 研究方向为系统工程与系统科学。

(C)1994-2023 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

学中的复杂性进行了报导,但各学科对复杂性认识还不一致,所以“本专题回避了一个术语上的雷区,部分是为了当方法进一步成熟时给定义的稳定留下一些空间。我们渴望避开术语上的争论,采用了一个‘复杂系统’的词,代表那些对组成部分的理解不能解释其全部性质的系统”。

再往前,1992年,M. Mitchell Waldrop 出版了 *Complexity — The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*,这是描述美国 SFI(Santa Fe Institute)研究所关于复杂性研究的一本书。这个研究所是1984年建立的,由三位诺贝尔奖获得者(夸克理论创建者 M. Gellmann、凝聚态物理学家 P. W. Anderson、数理经济学家 K. J. Arrow)发起。集中了一批不同领域、不同学科的青年科学家,开展跨学科、跨领域的研究,他们称作复杂性研究,这里既有自然界复杂性,也有人类社会及人自身的复杂性。他们提炼出复杂适应系统的概念,如生命系统、免疫系统、生态系统、人脑系统、经济系统等,认为“所有复杂系统都有一种能力,能使秩序及混乱达到某种特别的平衡,在这个我们称之为‘混沌边缘’的平衡点上,系统的组成分子从来不会真正锁定在一个位置上,但也从来不会分解开来,融入混乱之中。”“复杂、适应性、混沌边缘的骚动,这些一再出现的主题光芒四射,愈来愈多的科学家相信,其中的奥妙不止于它们彼此之间相似之处,而掀起这个运动的神经中枢,是个名叫圣菲研究院(SFI)的智库。”“他们相信,SFI正在架构的理论是第一个能替代自牛顿以来主宰科学的线性、简化论(reductionism)想法的严谨方案,而且这个方案能充分解释今日世界的种种问题。”“套句 SFI 创办人考恩(G. Cowan)的话,他们相信,他们正在开创‘21世纪的新科学’”。SFI的科学家先后运用自组织、混沌、涌现、自适应复杂系统这些概念来研究复杂性,而且很重视计算机技术在复杂性研究中的运用,相继提出遗传算法、演化算法、自动机网络等。

自组织、混沌这些概念和理论,在 SFI 之前就已出现,而且已产生了重大科学影响,这应归功于普利高津(Prigogine)和海肯(Haken)。他们的自组织理论至今仍在发展,由自然系统向社会系统扩散。再早一些的科学成就,应该归功于贝塔朗菲的一般系统论,维纳的控制论和山农的信息论,这些学问都出现在20世纪30—40年代,体现了一种从整体上研究事物的科学思想和理论。

## 2 复杂性研究的科学启示

### 2.1 复杂性研究需要新的科学方法

这里首先区分一下方法论(methodology)和方法(methods)。方法论是关于研究问题所遵循的途径和路线,在方法论指导下是具体方法。方法也不止一种,可能有多种方法。如果方法论不对,具体方法再好,也解决不了根本问题。从近代科学到现代科学,还原论方法发挥了重要作用,在自然科学中取得了巨大成功。它所遵循的途径是把事物分解成局部或低层次事物来研究,以为低层次或局部问题弄清楚了,高层次或整体问题也就清楚了。如果低层次或局部问题仍弄不清楚,还可以继续分解下去,直到把整个问题弄清楚了为止。物理学、化学、生物学基本上是按照这种方法论发展起来的,取得了巨大成就。

但是,现代科学技术的发展,向这种方法论提出了挑战,复杂性研究的科学背景就说明了这个问题。SFI的科学家们也认识到还原论方法处理不了复杂性问题,才提出复杂性研究,Gellmann曾说过:“对高度复杂的非线性系统,系统整体行为并不是简单的与部分行为相联系,要有勇气广泛地从各方面关注整体的状况,而不是个别方面的细节”。安德逊也讲:“将一切事物还原成简单的基本规律的能力,并不意味着我们有能力从这些规律来重建宇宙,当面对尺度和复杂性的双重困难时,构筑论的假设破坏了。大量复杂的基本粒子的集体,并不等于几个粒子性质的简单外推”。

一般系统论的提出,是想从整体上研究问题,所以称其为整体论方法。但限于当时的科学技术水平,整体论方法并没有真正发展起来。

著名科学家钱学森,在20世纪80年代曾明确提出“凡现在不能用还原论方法处理的,或不宜用还原论方法处理的问题,而要用或宜用新的科学方法处理的问题,都是复杂性问题,复杂巨系统就是这类问题。”这里既从方法论角度界定了复杂性,同时也指出了研究复杂性需要新的科学方法。

### 2.2 复杂性研究体现了现代科学技术发展的综合性、整体化的趋势

20世纪30年代,法国著名物理学家 Plank,讲了段颇具哲理的话:“科学是内在的整体,它被分解为单独的整体,不是取决于事物本身,而是取决于人类认识能力的局限性,实际上存在着从物理到化学,通

过生物学和人类学到社会学的连续链条,这是任何一处都不能打断的链条。”

Gellmann 在其《夸克与美洲豹——简单性与复杂性的奇遇》一书中也说“研究已表明,物理学、生物学、行为科学,甚至艺术与人类学,都可以用一种新的途径把它们联系在一起,有些事实和想法初看起来彼此风马牛不相关,但新的方法却很容易使它们发生关联。”

复杂性多有层次结构,如可持续发展问题,涉及到自然层次、社会层次、人文层次,涉及到自然科学、社会科学、人文科学,如何进行多学科、多领域的交叉研究,这是个很现实的问题。复杂性研究,要走精密科学之路,不仅要定性,还要定量研究,这个特点使它不同于一般的社会科学、人文科学的思辩性和描述性研究。现代科学技术呈现出既高度分化又高度综合的两种明显趋势。一方面是学科越分越细,新学科、新领域不断产生,另一方面是不同学科、不同领域之间的相互交叉、综合与融合,向综合和整体化方向发展,这两者是相互促进、相辅相成的。复杂性研究或复杂性科学代表了这后一发展方向,值得我们高度重视。

### 3 复杂性和系统科学

复杂性寓于系统之中,是系统复杂性。把复杂性和复杂系统结合起来,也便于从系统科学角度研究复杂性。实际上,SFI 在后来的复杂性研究中,也广泛使用系统的概念。

复杂适应系统(Complex Adaptive System)就是这类系统的结构能适应环境的变化,调整自身结构,从而涌现出新功能。如生物体系统的演化。这里运用了混沌对初始边界条件的异常敏感性,通过自组织调整自身结构,导致系统演化——涌现。SFI 想建立这类系统演化动力学。VISA 创始人哈克想把这个想法应用到社会系统,提出混沌的概念(Chaoer)。

系统科学是从事物的整体与部分、全局与局部以及层次关系的角度来研究客观事物的(包括自然的、社会的以及人自身)。能反应事物整体与部分、局部与全局以及层次关系的最重要的基本概念是系统。

系统是由一些相互关联、相互作用、相互制约的组成部分构成的具有某种功能的整体<sup>[2]</sup>。这里有两

个重要概念:“系统结构”、“系统环境决定系统功能”。

根据系统结构的复杂性:子系统数量和种类、子系统之间关联关系的复杂程度(非线性、不确定性、模糊性等)以及层次结构,钱学森将系统分为:简单系统、简单巨系统、复杂巨系统。复杂巨系统如生物体系统、人体系统、人脑系统、地理系统、社会系统、星系系统等。社会系统是最复杂的系统,又称作特殊复杂巨系统,这些系统又都是开放的,和环境有物质、能量和信息的交换,所以又称作开放的复杂巨系统。

这样的分类方法,从方法论和方法来看,对简单系统、简单巨系统都已有了相应的方法论和方法,也有了相应的理论,并在继续发展之中,但对开放的复杂巨系统包括社会系统的方法论却是个新问题,不是传统方法包括还原论方法所能处理的,它是一个科学新领域。如同复杂性研究一样,需要新的方法论和方法。钱学森曾明确指出,“SFI 的复杂性研究,实际上是复杂巨系统的动力学问题。”复杂适应系统的研究就是一种复杂巨系统的演化理论。

这里,应提及一下 1995 年《科学美国人》杂志上的一篇文章《复杂性研究的发展趋势——从复杂性到困惑》。作者霍根(J. Horgan)对 SFI 的工作进行了综述和评价,似乎复杂性研究陷入了困境,不知如何进行下去。实际上,这里所涉及的实质问题是方法论和方法问题。

既然还原论方法处理不了复杂性或复杂巨系统问题,那么研究复杂性和复杂巨系统的方法论和方法到底是什么?

### 4 方法论和方法

贝塔朗菲提出的一般系统论,即整体论方法,本来是想克服还原论方法的不足,想从整体上去研究系统。但“几十年来一般系统论基本上处于概念阐发阶段,具体理论和定量结果还很少”<sup>[2]</sup>。

20 世纪 80 年代初,钱学森就提出将还原论方法和整体论方法结合起来。到了 80 年代末 90 年代初,他先后提出“从定性到定量综合集成方法”以及“从定性到定量综合集成研讨厅体系”(以下简称综合集成方法论),并把运用这套方法的集体称为总体设计部。

综合集成方法的实质是把专家体系、数据和信

息体系以及计算机体系有机结合起来,构成一个高度智能化的人机结合、人网结合的体系。它的成功应用就在于发挥这个体系的综合优势、整体优势和智能优势。它能把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息统统集成起来,从多方面的定性认识上升到定量认识。

运用这个方法也需要系统分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到整体,实现  $1+1>2$  的飞跃,达到从整体上研究和解决问题的目的。既吸收了还原论方法和整体论方法的长处,同时也弥补了各自的局限性,既超越了还原论方法,也发展了整体论方法。

综合集成方法论,其理论基础是思维科学,方法基础是系统科学和数学科学,技术基础是以计算机为主的现代信息技术,实践基础是系统工程的应用,哲学基础是辩证唯物主义的实践论和认识论。从方法论角度来看,综合集成方法遵循:

(1)研究路线。综合集成方法采取由上而下和由下而上的路线,从整体到部分再由部分到整体,把宏观和微观研究统一起来,最终是从整体上研究和解决问题。

(2)技术路线。采取人机结合、人网结合以人为主要的信息、知识和智慧的综合集成,这个技术路线是以思维科学为基础的。

(3)实现信息、知识和智慧的综合集成。信息、知识、智慧这是三个不同层次的问题。信息的综合集成可以获得知识,信息、知识的综合集成可以获得智慧。人类有史以来,是通过人脑获得知识和智慧的。现在由于计算机技术的发展,我们可以通过人机结合的方法来获得知识和智慧,在人类发展史上,这是具有重大意义的进步。

具体来说,综合集成方法包括:

(1)定性综合集成。由不同学科、不同领域专家组成专家体系,对所研究的复杂巨系统和复杂性问题,进行多学科交叉研究,提出经验性假设、形成定性判断。它所以是经验性判断,是因为其正确与否还没有用严谨科学方式加以证明。

(2)定性定量相结合综合集成。建立数据和信息体系、指标体系、模型体系,通过系统仿真和实验,对经验性假设的正确与否给出定量描述,增加了新的信息,这个过程可能反复多次。

(3)从定性到定量综合集成。由专家体系对系统仿真和实验的结果进行综合集成,通过人机结合

反复对比、逐次逼近,直到专家们认为定量结果是可信的,也就完成了从定性到定量综合集成。如果定量结果否定了原来的经验性判断,那也是一种新的认识,又会提出新的经验性判断。

这样,从定性综合集成提出经验性判断,到人机结合的定性定量相结合综合集成得到定量描述,再到从定性到定量综合集成获得科学结论,这就实现了从经验性的定性认识上升到科学的定量认识。

钱学森提出的“从定性到定量综合集成研讨厅体系”就体现了这个特点。它是一个人机结合、人网结合的信息加工系统、知识生产系统、智慧集成系统,是知识生产力的实践形式(见图1)。

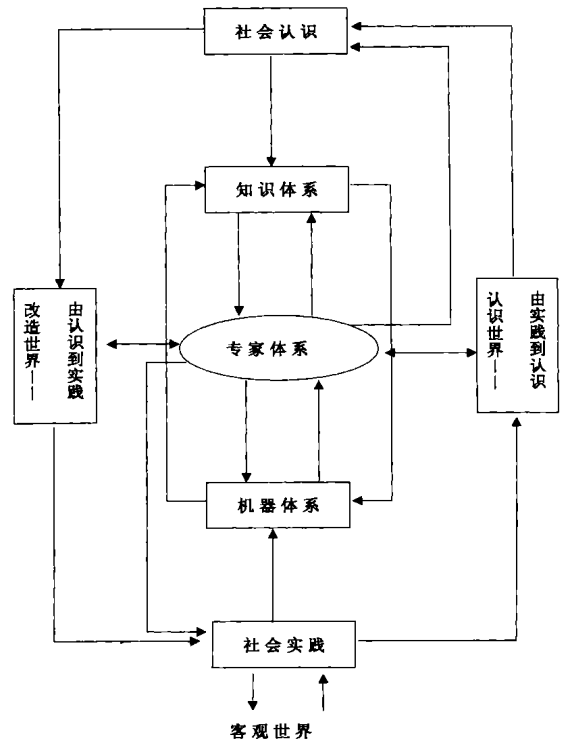


图1 研讨厅体系结构

这个研讨厅体系体现了:

- (1) 几十年来世界学术讨论的 Seminars 经验;
- (2)  $C^3I$  及作战模拟;
- (3) 从定性到定量综合集成方法;
- (4) 情报信息技术;
- (5) 人工智能;
- (6) “灵境”(VR、人工虚拟现实);
- (7) 人机结合智能系统;
- (8) 系统学;
- (9) 第五次产业革命中涌现出来的新技术……

综合起来,三种方法论可以形象地表示为:

综合集成方法:  $1+1>2$

还原论方法:  $1+1\leq 2$

整体论方法:  $1+0=1$

SFI 科学家们,也走的是人机结合的技术路线,但却走了以机器为主的路线,他们在方法上是有创新的,但在方法论上还没突破还原论方法的束缚,所以,他们的困惑是在方法论上,而不是在方法上。

## 5 面向具体复杂性问题的研究

复杂性研究,不能从概念到概念,还应结合具体复杂性问题进行研究,研究成果多了,理论上的概括才有基础。

(1)软科学研究,是一个交叉性研究领域,目前还没有给予充分重视。其实,这是一个很实际的复杂性研究领域。

(2)管理科学研究,管理科学是自然科学、社会科学、人文科学、工程技术的交叉、综合性研究领域,目前虽然受到了重视,但在科技界还没有成为重要的领域。

实际上管理科学也好,软科学也好,他们都涉及到物理、事理、人理这样三个层次的知识,涉及到自然科学、社会科学、人文科学的三个层次的知识。三个层次的知识最后怎么结合起来,恐怕最后还得靠不同类型、不同领域知识的综合。复杂性研究更多的还是应该面向世界,通过实际问题的解决不断积累经验,最后成为概括。

综合集成方法论的提出到现在也不过 10 多年的时间,无论是方法论本身,还是它的应用,都取得了可喜的进展,但从长远来看这些进展仅仅是开始。方法论的创新,将孕育着伟大的科学革命。培根创立的还原论方法,推动了 19 世纪到 20 世纪的科学大发展。钱学森深谙西方科学哲学的精髓,又吸取中华民族古代哲学的营养,使他能够把还原论与整体论结合起来,并运用辩证唯物主义,创立了综合集成方法论,它必将推动 21 世纪系统科学的大发展。

## 参考文献:

- [1] 李政道. 前沿学科热点话题卷首语[J]. 科学世界, 2000, (1).
- [2] 钱学森. 创建系统学[M]. 太原: 山西科技出版社, 2001.

## Complexity research and system science

YU Jingyuan<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Information Control, Beijing 100037, China;

2. China Aerospace Science and Technology Group, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The paper introduces the background and inspiration on complexity research, then combines complexity with complex systems and studies complex problems from a point of view of system science. The paper is focused on methodology for complex systems research——meta-synthesis.

**Key words:** complexity; system science