



于景元教授在中国科学院研究生院做演讲

关于 复杂性研究

文 / 于景元 刘毅

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论。

科学背景

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(见图1)。

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。

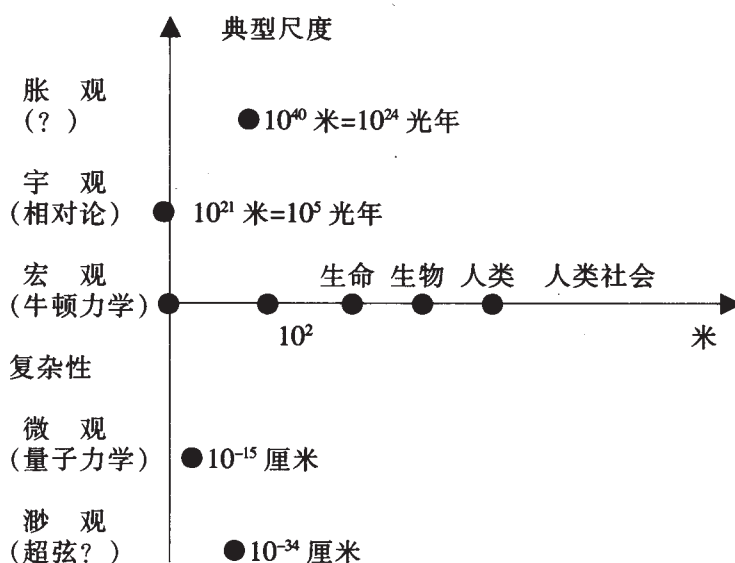
人的智能形成,脑科学、思维科学,都有了很大进展。

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?

诺贝尔奖获得者李政道教授在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



图(1) 时空层次图

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，这里所需要的科技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, T. Appenzeller 写了个前言，题目是“超越还原论”。他们写道“物理化学中的现象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的相互作用。我们有采取这种还原论的最好理由：它有效。”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之一”。

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 Santa Fe Institute 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发起，他们是夸克理论创建者 M. Gell-mann、凝聚态物理学家 P.W. Anderson、数理经济学家 K.J. Arrow。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。并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，他们认为“事实上，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的智库。”

“他们相信，圣菲研究院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。”“套句圣菲研究院创办人考恩（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 Prigogine 和 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。

复杂性研究的科学启示

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问题。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，上一节谈到复杂性研究背景，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，Gell—mann 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、科学发展方向上，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。”

Gell—mann 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牛马不相关，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，向综合和整体化方法发展，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后一发展方向，值得我们高度重视。

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, CAS) 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，提出混序的概念 (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。

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了，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。”CAS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?

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”。

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20世纪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 $1+1 \gg 2$ 的飞跃,达到从整体上研究和解决问题的目的。这样,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,综合集成方法所遵循的——

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。

技术路线。采取人、机结合,人、网结合以人为主的信息、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。

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,即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2)

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) C³I 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： $1+1 \equiv 2$

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，重要的领域。

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。

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，理论上的概括才有了基础。

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

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 年多的时间，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，推动了从 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。这个方法论必将推动 21 世纪系统科学的大发展。

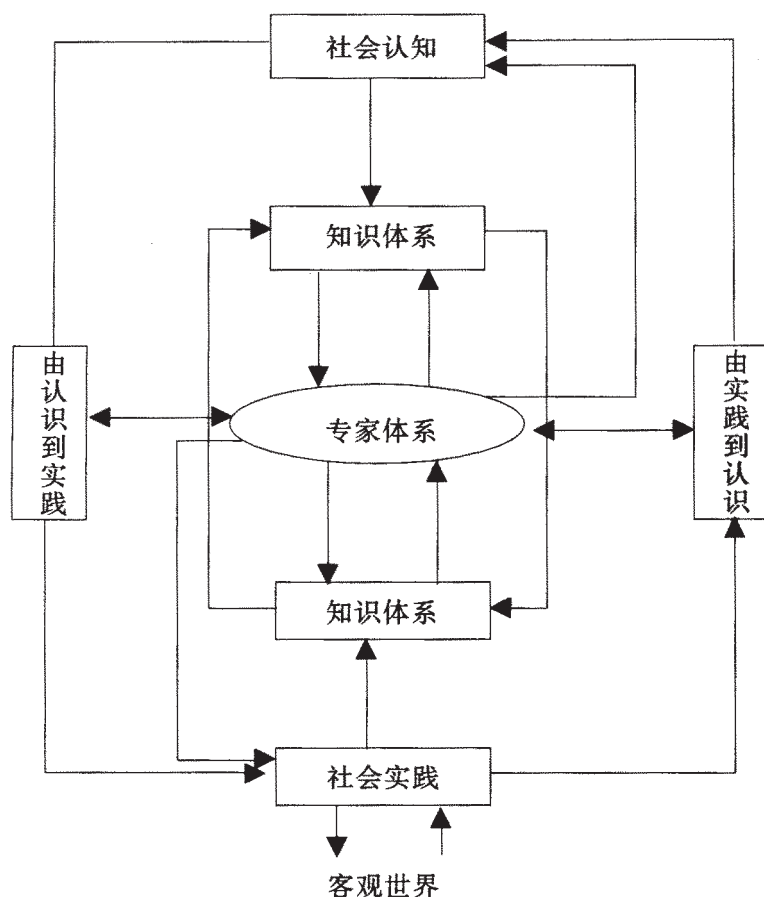


图 2) 研讨厅体系结构

作者简介：于景元 北京信息控制研究所科技委主任、研究员，国务院学位委员会委员，国家自然科学基金委员会“管理科学与工程”学科评议组组长