

复杂性科学探索

成思危 主编

- ★ 复杂性科学概论
- ★ 经济管理复杂系统及复杂性
- ★ 生物复杂系统及复杂性
- ★ 其他复杂系统及复杂性



民主与建设出版社

复杂性科学探索

(论文集)

主 编 成思危

副主编 冯芷艳

民主与建设出版社

图书在版编目(CIP)数据

复杂性科学探索(论文集)/成思危主编. -北京:
民主与建设出版社, 1998. 8

ISBN. 7-80112-311-5

I. 复… II. 成… III. 科学研究-文集 IV. G3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 32024 号

责任编辑 徐昌强

封面设计 孙 岩

出版发行 民主与建设出版社

电 话 (010)65275953

社 址 北京东城区东厂胡同 1 号

邮 编 100006

印 刷 北京飞达印刷厂

开 本 850×1168 1/32

印 张 9

字 数 202 千

版 次 1999 年 8 月第 1 版 2000 年 6 月第 2 次印刷

书 号 ISBN 7-80112-311-5/F. 080

定 价 26.00

注:如有印、装质量问题,请与出版社联系。

试论科学的融合^{*}

(代序)

一、科学融合的趋向正在兴起

早在 100 多年以前，马克思就曾经预言：“自然科学往后将会把关于人类的科学总括在自己下面，正如同关于人类的科学把自然科学总括在自己下面一样：它将成为一个科学。”

我国国家杰出贡献科学家钱学森教授十分推崇马克思的自然科学与关于人类的科学将会成为一门科学的预言，并称这一过程为自然科学与社会科学的一体化。在他的影响下，我国系统工程界的一些学者开始注意学习社会科学知识，并与社会科学家联合研究一些软科学及管理科学问题，且已取得了一些成果，例如《国家 12 个重要领域技术政策的研究》、《人口系统定量研究及其应用》、《2000 年的中国》等。钱老在 1996 年 7 月 2 日与我的谈话中又提出：“有些涉及到用社会科学来解决管理科学与自然科学之间的问题，就要找一找社会科学家。就是要找那些现在具体在做工作，又能接受管理科学这个概念的，在科学技术工程界和社会科学界之间建立联盟。”

从科学的发展历史中可以看出，在科学处于萌芽阶段的古代文明中，科学是一个统一的体系。作为古代科学代表人物的

^{*} 本文原载《自然辩证法研究》，1998 年第 1 期。

亚里士多德，就是将哲学、自然科学与社会科学综合在一起而建立了一个包括哲学、天文学、物理学、动物学、植物学、逻辑学、政治学、美学等等方面的体系。以后哲学逐渐独立出来，并被披上了神学的外衣，而科学的发展也由于受到社会政治动乱的干扰和宗教意识形态的压制，长期处于基本上停滞的状态，仅在中国及阿拉伯国家取得了一些进步。直至 15 世纪下半叶，在文艺复兴运动的推动下，随着社会的进步及生产的发展，科学才逐渐分化为自然科学与社会科学两大部类，而每一部类又逐渐分化为各门学科，这一过程直到 18 世纪才基本完成，并分别形成了自然科学与社会科学两大科学体系。这一科学分化的过程至今仍在继续，并已经形成了自然科学、技术科学、社会科学与人文科学四大部类。

在科学不断分化的同时，科学的融合过程也在悄然兴起。一是同一科学部类内部的有关学科之间的相互交叉与渗透，产生了例如物理化学、生物统计、射电天文、经济地理等学科；二是不同部类的有关学科之间的相互交叉与渗透，产生了例如数理经济、社会生物、计量历史等学科；三是由于科学与技术的紧密结合，使得许多学科实现了工程化，产生了例如化学工程、生物工程、知识工程、金融工程等学科；四是近数十年来出现了系统论、控制论、信息论、协同论、突变论、耗散结构论、超循环论、混沌理论等一批“横断”学科，它们所发现的一般规律正在越来越多的学科中得到应用；五是出于科学研究活动的群体化及社会化程度不断提高，以及数学模型及计算机的普遍应用，自然科学家要学习经济与管理知识，而社会科学家则要学习数学与计算机知识，双方的相互了解日益增多。目前这一融合过程还在继续并不断增强，最后将会在此基础上实现新的综合，进而实现科学的融合。

实现科学融合的哲学基础是客观世界的系统性,即客观世界是一个由相互联系的各部分所组成的、不断发展变化的系统。由于每一门学科的研究对象仅是这一系统中的一小部分,因此在研究过程中决不能忽视其研究对象与系统其他部分的联系。而只有将各门学科及各学科部类的研究成果综合集成起来,才能取得对客观世界的全面的认识。著名物理学家普朗克早就指出:“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的本身,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的链条,这是任何一处都不能被打断的链条。”近年来,一些有识之士不断地大力提倡和推进跨学科研究。1984年,在诺贝尔奖获得者 Murray Gell-Mann、Philip Anderson、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,简称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,并已取得了一些有意义的成果。

但是,应当看到,实现科学融合是一个长期的、艰巨的、有时甚至是痛苦的过程。由于各门学科的研究对象、发展历程、研究方法等方面的不同,再加上长期以来的学科分割、“隔行如隔山”、“文人相轻”等主观因素,以及缺乏人才、技术及经费等客观因素,使得学科之间的综合集成难以实现,距离科学融合的目标就更加遥远了。

近年来有些未来学家指出,由于科学发展的代价增大及科学研究中的保守倾向,科学发展的速度可能变慢,甚至出现一种知识危机,而为了获得最大限度的科学进展,至关重要的是研究科学中的方法,而不是科学中的学术。目前,我以为有必要从战略的高度来探讨推进科学融合的问题,希望能引起各方

面对此问题的重视，并在推进科学融合的过程中不断实现科学方法的创新。

二、全面深入地认识客观世界的系统性及系统的复杂性

根据辩证唯物主义的观点，人类对客观世界的认识来自以人类的生产活动为主的社会实践，并且会随着社会实践的发展而不断深化，即由浅入深、由表及里、由个体到整体、由部分到系统。自本世纪初以来，由于社会实践的广度及深度的迅速扩展，以及科学技术的高度发展，人们对客观世界的系统性及系统的复杂性的认识也更加全面而深入。这种认识可以概括为以下几个方面相结合（辩证的统一）：

1. 微观与宏观的结合

人们对客观世界的认识往往是从个别事物开始的，但是当人们认识了一类事物的若干个体后而想把握对其总体的认识时，逐渐会发现个体与总体的性质之间有以下几点差异：

总体具有个体所不具备的某些性质。例如气体分子的集合可以具有压力、温度等性质，人的集合会产生群体素质、等级特性，等等。

总体的性质可以与个体的性质联系起来。例如气体的压力可以表达为气体分子对器壁的平均碰撞强度，气体的温度可以表达为气体分子的平均动能，一个组织的群体素质可以表达为其知识结构等。

无规律运动的个体可以组成有规律运动的整体。例如分子的无规律的布朗运动在总体上服从热扩散定律，在金融市场上自由行动的投资者在总体上仍有一定的规律可循。

上述情况都说明从个体的角度（微观）来认识事物与从总体的角度（宏观）来认识事物有相当大的区别。为了对客观世界取得全面而深入的认识，必须注意微观与宏观的结合。

2. 层次结构与功能结构的结合

按照系统论的观点，可以将由个体（单元）集合而成的整体称为系统。系统有两种基本的结构，即层次结构（由物理位置或逻辑位置相近的单元所组成）与功能结构（由实现同一功能的单元所组成）。例如人体可以划分为头、手、足等部分，也可以划分为呼吸系统、消化系统等部分；一个国家的经济系统可以按地区来划分，也可以按行业来划分，等等。在研究一个系统时，必须注意这两种结构的结合。

3. 静态与动态的结合

客观事物总是处于不断的发展变化之中，它从一个状态推移到另一个状态，这一推移就称为过程。因此事物的发展可以看成是状态与过程的交迭。对一项事物既可以从静态的角度（研究其状态），又可以从动态的角度（研究其过程）来进行研究。随着人们对客观世界认识的深化，逐渐发现静态是相对的，难以全面把握的。由于客观事物在研究过程中会不断变化，若想获得尽可能全面的认识，通常只有两种办法，一是将其某一状态人为地“冻结”起来，再在“离线”的情况下进行详细的研究；二是尽量加快研究的进程，从而可在研究对象的状态变化尽可能小的“在线”情况下完成。近年来人们发现，最好的方法是将静态与动态结合起来，从一事物过去的状态推移来加深对其现状的认识，并预测出其发展变化的方向。例如在处理物质流、能量流与信息流的过程工业中，往往是用静态模拟来研究其状态，以便进行物料衡算及热量衡算；而用动态仿真来研究其过程，以便进行过程控制与操作培训。现在的趋向则是

将二者结合起来，用统一的模型（例如将静态模型中的参数表示为时间的函数）来进行模拟及预测控制。

4. 系统与环境的结合

为了便于进行研究，通常将研究对象看作系统，而将其外部世界看作环境，并且还常假设系统处于与环境隔绝的平衡状态。实际上系统与环境之间有着千丝万缕的联系，并常有物质、能量及信息的交换。因此在研究一个系统时必须注意其与环境的联系，特别是在系统与环境边界处所发生的过程。同时还应注意系统与环境之间的相互作用，环境的变化固然会影响系统的发展，但系统的变化也常会引起环境的变化。例如一个国家的经济系统会受世界经济形势变化的影响，而此经济系统的变化也会或多或少地影响世界经济形势。还应看到，系统及其环境都不是均一的，因此系统内部各单元之间的相互作用以及系统的某一部分与环境某一部分之间的相互作用的可能域（即各种可能性的集合）几乎是无穷无尽的，这也是系统产生随机性的原因之一。

5. 明确性与模糊性的结合

应当承认，客观世界从哲学上说是可知的，但在实际上却总有未知的部分。例如在社会、经济、人体、人脑等系统中，还存在着许多未知的部分，其中有些部分可能会随着科学的发展而逐渐变为已知，但也有些部分由于十分复杂多变而实际上难以明确。正如列宁所指出：“要真正地认识对象，就必须把握和研究它的一切方面、一切联系和‘媒介’。我们绝不会完全地做到这一点……。”因此我们应当承认在对客观世界的认识中存在着一定的模糊性，并采取适当的方法来处理这种模糊性，使其相对地“明确化”。近年来有些学者将模糊数学用于系统研究中，取得了良好的效果。

6. 确定性与随机性的结合

由于系统内各单元之间是相互联系的,因此人们往往会认为这种联系是固定的,系统与其内部各单元的变化之中存在着因果关系,而系统的发展变化是有一定的规律可循的,从而认为系统是确定性的,从广义上说是有序的。但是随着科学的发展,特别是量子力学、分子生物学等方面的发现,人们开始认识到系统的随机性,即由于一些偶然性因素的作用,系统内会出现多变的联系,不可预知的因果关系,以及无一定规律可循的发展变化,从广义上说是无序的。近年来还发现,即使是在确定性的系统中,也存在着内在的随机性,就是所谓混沌的现象。应当承认,确定性与随机性都是客观存在的。从较短的时期内和较低的层次上看来,随机性可能会出现较多,甚至会起主导作用;但是从较长的时期和较高的层次上看来,确定性还会起主导作用。例如人类历史的发展方向从长远和全球的角度看来是确定的。但在某一时期或某一国家内则完全可能出现混乱、倒退或反复。人们永远不可能准确地预测未来,但概括地预测未来是完全可能而且十分必要的。这就是确定性与随机性的结合。

7. 自组织与组织的结合

由于系统内部各单元之间的相互作用,可以使系统向功能更强、更加适应外部环境的方向发展变化,例如生物的进化、技术的进步、社会的发展,等等。这一过程就称为系统的自组织。正如钱学森教授所指出:“系统自己走向有序结构就可称为系统自组织……。”在某些情况下,可以通过外部环境的改变,人为地加速或延缓系统的发展变化,这一过程可称为系统的组织。例如在经济系统中,无数企业及个人的日常经济行为通过市场这一“看不见的手”在促进经济的发展,而政府这只“看得见的

手”也可以通过调整利率、税收政策及货币发行量等手段来进行宏观调控。在任何一个国家的经济系统中，都存在着这两只手的作用，只不过在二者相对的强弱上有所区别。但应当注意的是，宏观调控决不能违反客观的经济规律，否则将会适得其反。正如毛泽东所指出：“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的依据，外因通过内因而起作用。”

在上述认识的基础上，美国的一些科学家于 80 年代初明确提出了系统的复杂性问题。例如前述的 SFI 的科学家们认为，复杂系统是由大量相互作用的单元构成的系统，复杂性的研究内容则是研究复杂系统如何在一定的规则下产生有组织的行为，进而提出了复杂的适应性系统的概念。在这一思想指导下，他们集中了一批优秀的科学家进行了跨学科的研究，并已在经济系统的发展、免疫系统的形成、人工生命、人工神经网络计算等方面取得了一些有意义的成果。

我国钱学森教授也于 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。在以后的几年中，他对与此有关的问题又作了许多精辟的论述。戴汝为教授在其所著的《复杂巨系统科学——一门 21 世纪的科学》一书中对钱老的主要观点进行了详尽的阐述，本文不再复述。遗憾的是，由于各种客观上的原因，钱老的许多预见未能付诸实践，因而也难以用实践经验来推进开放的复杂巨系统理论的发展。

如果说自 50 年代以来，科学家们已逐渐接受了客观世界的系统性的观念，那么在 90 年代的今天，科学家们还应当接受系统的复杂性的观念。综合中外科学家迄今为止在复杂系统（为了行文简洁，在下文中将复杂的适应性系统与开放的复杂巨系统均简称为复杂系统）方面的研究成果，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他单元变化的影响，并会引起其他单元的变化。

(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，它不断地处于发展变化之中，而且系统本身对未来的发展变化有一定的预测能力。

虽然每一个学科所研究的对象仅是客观世界的一小部分，而且各不相同，但如果科学家们都能对客观世界的系统性及系统的复杂性取得一致的认识，将会极有力地促进科学的融合。

三、发展并完善定性与定量相结合的综合集成方法

尽管各部类科学的研究方法大不相同，即使在同一部类的各学科之间的研究方法也不尽相同，但从方法论的高度上说，对复杂系统应当有一个带普遍性的研究方法。可以认为，钱学森教授于 1990 年提出的定性与定量相结合的综合集成方法是迄今为止最值得重视的方法。现仅根据笔者本人学习与实践的体会，对这一方法的实质及如何发展并完善这一方法作一些初步的探讨。

这一方法的实质是将科学理论、经验知识和专家判断相结

合,提出经验性的假设,再用经验数据和资料以及模型对其真实性进行检测,经过定量计算及反复对比,最后形成结论。它是研究复杂系统的有效手段,其主要特色如下:

1. 定性分析与定量分析相结合

定性分析是指通过判断及推理,从用观察或调查等方法所得到的数据中获得对某一系统的性质及其发展规律的认识。它广泛用于社会科学与人文科学的领域内,这一方面是由于难以对其研究现象作定量的描述,另一方面则由于它主要依靠研究人员的经验。而定量分析则是指通过计算(包括数学运算、统计及仿真)与数学推导,从实验或实践得到的数据中获得对某一系统的结构及其变化规律的认识。定量分析广泛用于自然科学与技术科学的领域中,这一方面是由于其所研究的对象是数量化的,另一方面则由于它主要依靠丰富的数据及严密的推断,依靠经验的成份较少。

在自然科学的某些学科中早已采用定性分析的方法,例如动物及植物的分类、地质年代的判别、中医的望闻问切、辩证施治等。而在社会科学及人文科学中也已逐渐引入了定量分析的方法,例如数理经济学、计量历史学等。当前需要进一步促进这两种方法的结合,而且这一结合应当是双向的,即既可以由定性到定量,例如可以先根据定性分析的结果构筑概念模型,再逐步将其量化而成为定量模型,通过运算而得出定量的结论;也可以在定量分析所得出的结论的基础上进行判断推理,并考虑一些难以量化的因素,从而作出最终的决策选择。

当前应当注意克服重定量而轻定性的倾向。特别是有些自然科学家和技术专家片面地认为只有定量的方法才是科学的方法,对定性的方法采取排斥的态度,这种偏见对科学的融合是极端有害的。实际上,只有定性分析与定量分析相结合,才能

得出真正科学有效的结论。例如从一地到另一地的路径选择问题,从一般科学家的观点看来,只要用传统的运筹学求出最短路径就可以了。但从经济学家的观点看来,这并不一定是最优的选择,因为可能会在最短路径上因堵车而增加油耗且浪费时间,因此一个了解路况的司机可能会选择另一条更好的道路。但即使所有的司机都能通过无线电台而获得路况的完全信息,行为科学家还要考虑到司机的择路行为,有经验的司机往往会作出更好的判断而选择最佳的路径。

在社会科学家中则存在着两种倾向:有些经济学家过分追求高深的数学方法,沉迷于复杂的数学推导中,而忽视了对经济机制及规律的探讨,因而会得出背离实际的结论;也有些社会科学家仍死抱着传统的观念,不相信也不愿意学习及运用定量分析的方法。

总之,当更多的科学家相信只有通过计算与“算计”相结合才能更好地发挥科学的作用时,科学的融合方有可能建立在有共同语言的基础上。

2. 分析与综合相结合

简单地讲,分析就是了解一个已有系统的单元、结构及功能,而综合则是将有关的单元集成为一个具有预定功能的系统。在研究复杂系统时,这两种手段是交替使用、相辅相成的。我们既要了解一个系统是由哪些单元所构成,其层次结构和功能结构如何,系统的总体功能是什么;也要了解系统是如何通过组织及自组织而不断演化,如何由低级状态逐步发展到高级状态。对某一层次的分析通常会为其上一层次的综合打下基础。例如 SFI 的科学家在研究生命的起源和进化问题时,就先研究了经分析确定的各种小分子在小环境(称为原生池)中综合成生物大分子的过程,认为这是聚合与离解两个相反基本过程的动

态平衡,只有那些在聚合方向上占优势的大分子才能有较大的机会存在,而且优势越大其存在的稳定性也越高。然后通过简化模型的计算机模拟,发现确实有些大分子在数量上占优势,而且这一优势会随着环境的改变而变化。他们进而用计算机模拟了基因组随环境的变化而进化的过程,发现一个种属的基因组会不断地发生变化,以改善其对环境的适应性。

3. 专家知识的集成

复杂系统的研究通常需要多学科领域的专家们参加,这就需要有一个将各领域专家的知识进行集成的方法,而且这一集成过程应当贯彻研究的全过程。例如在软科学研究中笔者曾经提出,要实现软科学专家(通常是负责综合集成的专家,最好能由通晓软科学研究的主要领域专家来担任)与领域专家及决策者的结合,软科学专家与领域专家不仅是在一起工作,还要相互了解、相互尊重。领域专家一定要树立总体观念,不能只顾追求自己领域内的局部最优。决策者应当向软科学专家提出课题,并尽量参加总体框架的制定及方案选择的讨论,还要在研究过程中经常与软科学专家及领域专家交换意见。在软科学研究的五个基本环节(目标分析及总体框架的建立、现状分析及预测、建立模型、方案评价及选择、提出建议)中,都需要注意专家知识的集成(详见笔者所著的《论软科学研究中的综合集成方法》一文,载于《中国软科学》1997年第3期)。

4. 专家经验判断与计算机运算的结合

专家的经验判断是十分宝贵的,它通常包含着对系统的结构及动力学的深刻了解,但是这种判断往往是定性的,而且不尽一致。而计算机运算则具有强大的数据处理能力,能够以很快的速度定量地显示专家的判断,展示系统的结构与发展,并能模拟出各种假想方案的预期结果。因此复杂系统的研究需要

人脑与电脑的结合。一般说来,人脑比较擅长于形象思维,富有创造性,适于进行定性分析;而电脑则擅长于快速计算及按照既定的规则进行严格的逻辑推理,虽然可以具有自学习功能,但绝无创造性,适于进行定量分析,二者正好可以相辅相成。

为了发展并完善定性与定量相结合的综合集成方法,需要在一些关键技术上有所突破。例如在软科学研究中就需要突破定性变量及其相互关系的量化技术、开放的复杂巨系统的总体表征技术、价值体系的建立及表达技术、群决策中的妥协技术,等等。

著名哲学家波普曾指出:“把自然科学方法与社会科学方法对立起来,是一种‘反自然主义’的倾向。自然科学的解释和历史解释的关系问题,类似于纯科学与应用科学的解释问题,社会科学应具有和自然科学统一的研究方法。”笔者深信,各门学科在方法论上的逐步接近,必将有助于科学的融合。

四、需要采取的几项战略措施

为了促进科学的融合,需要采取以下几项战略措施:

1. 鼓励科学家自觉地学习并掌握马克思主义哲学

科学家在探索客观世界规律的过程中,在其世界观及方法论上总会自觉或不自觉地受到某种哲学思想的影响。应当承认,大多数科学家是具有朴素的辩证唯物主义倾向的。如果他们能自觉地学习并掌握马克思主义哲学,一定会如虎添翼,更有利于推进其研究工作,并促进科学的融合。但是这种学习一定要在自觉自愿的基础上,认真研读,深入思考,联系实际,求得新知。恩格斯曾指出:“随着自然科学领域中每一个划时代的发

现，唯物主义也必然要改变自己的形式。”江泽民同志在十五大报告中也指出：“马克思主义是科学，它始终严格地以客观事实为依据。……马克思主义必定随着时代、实践和科学的发展而不断发展。”科学家们都很容易理解，如果我们今天还将牛顿力学奉为圣明，而把量子力学和相对论看成是异端邪说，那就不会有核能的利用和航天的成功；如果我们把马车看成交通工具的唯一形式而不允许改变，那我们今天就坐不上汽车和飞机了。中国的科学家们不但要在马克思主义哲学的指导下探寻客观世界的规律，同时也应当用科学的新发现来丰富并发展马克思主义哲学。

2. 鼓励跨学科的研究

跨学科研究是当今科学发展的必然趋势，也是科学融合的起点，应当予以鼓励。建议先围绕国家目标，选择一批重大的课题，打破学科、行业、部门的界限，组织起跨学科研究的队伍，并不断探索改进其组织体制及运行机制。目前有些名为跨学科的课题，实际上其内部还是学科壁垒森严，各行其是，这种状况应当改变。

管理科学与软科学是自然科学与社会科学的接合部，理应成为推进科学融合的突破口。管理是生产力中的软件。只有通过管理才能将劳动者、劳动资料和劳动对象这三个要素合理地组织起来，加速生产力的发展。管理科学的研究对象是管理中的客观规律，数学、经济学及行为科学是它的三个重要基础。而软科学是宏观层次上的管理科学，主要是为各级各类的决策提供支持。因此努力发展管理科学及软科学不仅是推进科学发展及融合的需要，也是推进我国国民经济健康发展的需要。

3. 努力培养跨学科研究人才

当前开展跨学科研究的重大困难是缺乏人才。这类人才是