

谨以此文怀念本文作者导师钱学森先生
愿先生创立的“综合集成方法论”不断发扬光大

从定性到定量的综合集成法的形成与现代发展

戴汝为

中国科学院院士,中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室,北京 100190

关键词 以人为本 人机结合 信息空间 综合集成

由钱学森创立的从定性到定量综合集成法具有前期系统的工程实践,特别是军事系统工程的实践的基础;是适应国际上系统工程方法论的迫切需要;体现了科学是一个整体的自然科学与社会科学的交叉与融合;同时是思维(认知)科学研究以及国际间计算机科学发展以人为本的时代潮流。中国科学家在信息空间构建综合集成研讨体系取得进展,已经在一些领域得到应用,受到国际同行的重视。

20 世纪后期,中国科学家钱学森在《创建系统学》一书中提出了“从定性到定量的综合集成法”。早期是作为一种关于开放的复杂巨系统的方法论在 1990 年^[1]提出的,当时的提法是“定性与定量相结合”。为了从认识论上澄清把定性 with 定量相结合发展为从定性到定量的概念,钱学森撰文《再谈开放的复杂巨系统》^[2],并安排笔者把从定性到定量的综合集成法研究的结果共同于次年发表^[3]。其后,对从定性到定量的综合集成法在 1996 年出版的著作中做了进一步的阐述^[4]。这个过程是创建系统学的重要组成部分。钱学森认为以人为本、人机结合、从定性到定量的综合集成,就是把一个非常复杂事情的各个方面综合起来,把人的思维、思维的成果、人的知识与智慧以及各种情报、资料、信息统统集成起来。他曾把“综合集成”的英文定名为 metasyntesis engineering。

这些工作一方面展示了中国在系统科学、复杂性科学及思维(认知)科学研究的成果,同时也是国际上倡导对还原论反思、系统分析进而开展群体智慧、多元决策的学术趋势。十几年来通过多学科交叉研究、现代信息和智能技术的运用,中国科学家在技术上实现了综合集成研讨空间体系,它可为多个领域研究人文与科学相结合的相关复杂问题,提供可操作的技术平台。

为了深入理解钱学森创建的以人为本、人机结合的从定性到定量的综合集成法,有必要了解其形成过程和国际、国内的研究状况,从而认识其博大精深的内涵。

1 前期系统工程实践和军事系统工程的奠基

钱学森自 20 世纪 40 年代就参与了美国最早的导

弹研究,回国以后在中国“两弹一星”的事业中建立了卓越的功勋。他在领导航天军事等工作中最早采用了系统工程,并且总结出一套定性和定量相结合的方法学。

兰彻斯特(Lanchester)在 1916 年发表的关于战斗单位数量损失率的两组微分方程,分别是克劳赛维茨(Clauswitz)《战争论》中两条作战经验的科学表达,是科学与经验巧妙结合的产物。兰彻斯特的伟大贡献在于为作战模拟开辟了一条半经验半科学的正确途径。

1982 年中国军事研究在讨论兰彻斯特的工作时,钱学森根据在领导航天工业时积累的丰富的实践经验,提出过一个见解:处理作战模拟的定量方法学,是科学理论、经验和专家判断力的结合。这种定量方法学,是半经验半理论的。他从这一见解得到启发,提出经验性假设(判断或猜想)是建立复杂作战模拟模型的出发点。这些经验性假设(判断或猜想)不能用严谨的科学方式证明,但需要用经验性数据对其确实性进行检测。从经验性假设(判断或猜想)出发,通过定量方法学途径获得的结论,仍然具有半经验、半理论的属性。当人们寻求用定量方法学处理复杂行为系统时,容易注重于数学模型的逻辑处理,而忽视数学模型微妙的经验涵义或解释,坠入机械唯物论的迷雾中。要知道,这样的数学模型,看来“理论性”很强,其实不免牵强附会,从而脱离真实。与其如此,不如从建模一开始就老老实实承认理论不足,而求援于经验判断,让定性的方法与定量的方法结合起来,最后定量。这样的系统定量分析方法学是建模者判断力的增强与扩展,是很重要的^[5]。

2 系统工程方法论研究有待突破

方法论是一个理论体系,是表达其理论观点、构建其理论体系、实现其理论要求的一整套基本方法。方法论是认识世界、改造世界的基本方法的学说。科学的方法论是一种认识和改造世界的有效工具,从认识上其适用范围更广,从功能性上有可操作性,作用上能直接具体达到所要求的目的。

不少国家尽管系统工程领域早已开展了方法论的研究,许多学者等人都发表了专门的论著,但他们多限于简单地把系统工程看成一个过程,停留在使用方法的研究,而没能进入方法论的殿堂。

1980年,著名的国际应用系统分析研究所(IIASA)曾组织过一次对于系统工程的反思的讨论会,他们也谈到了需要一个坚实的方法论的基础,传统的还原论方法已不适用,特别强调要从实际需求出发,并运用经验知识,等等^[6]。

100多年来,由于研究人员仍然是囿于传统的狄卡尔(Descartes)、加里略(Galileo)、牛顿(Newton)和莱布尼兹等人所创立的近现代科学研究的方法论和观念——强调还原论和对基本性定律的追求。从方法论角度来看,在近代科学到现代科学的发展过程中,还原论方法发挥了重要作用,特别是在自然科学领域中取得了很大成功。还原论方法由整体往下分解,研究得越来越细,这是它的优势方面。由下而上则不一样,它回答不了高层次和整体问题,还原率方法处理不了系统整体性问题。面对这种困境,不同的研究人员展开了各种探索性的工作,期望能够发现另一条道路以继续他们的研究,比如在美国新墨西哥州的圣菲汇集了一批各个领域的杰出科学家,成立了一个多学科交叉的科学研究中心——圣菲研究所(Santa Fe Institute)。他们在复杂性这面旗帜的引导下,从不同角度和层次上对上述的一些问题进行研究,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了大家关心的中心问题。诺贝尔物理学奖获得者安德森(Anderson)称之为科学的前沿。圣菲研究所的第一任所长,也是前洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Lab)研究中心的主任,克恩(Cowan)甚至认为圣菲研究所是一个使命、是一个为整个科学界获得拯救和新生的契机;他认为圣菲研究所所要达到的目的远比洛斯阿拉莫斯国家实验室更为重要。但是圣菲研究所的一些成员仍然没有完全摆脱还原论的影响,尽管他们在用计算机技术对人工生命及人工社会进行了不少研究,但是使得他们的工作仍不

得不陷入到困惑当中^[7,8]。在方法论上,虽然他们也意识到了还原论方法的局限性,但并没有提出新的方法论。方法论和方法是两个不同层次的问题。

3 自然科学和社会科学用系统观点交叉研究的进展

既然还原论方法处理不了复杂性问题,那么研究复杂性问题的方法论到底是什么?圣菲研究所主要依靠计算机技术,那么,仅靠计算机技术是否就能解决复杂性问题。从信息处理角度来看,人脑思维一种是逻辑思维,它是定量、微观处理信息方式;另一种是形象思维,创造思维是逻辑思维和形象思维的结合,也就是定性和定量相结合、宏观与微观相结合,这是人脑创造性的源泉。

20世纪70年代末,在把系统工程推广应用到更复杂的系统中去时,如社会系统工程,钱学森就意识到必须发展系统工程方法。80年代初,他曾提出,处理复杂行为系统的定量方法学,是科学理论、经验和专家判断力的结合。这种定量方法学是半经验半理论的。

1986年初开始举行的,共八十余次关于系统学讨论会上,钱学森多次明确提出了系统科学的体系:即与哲学联系的系统论;基础层次的系统学;应用基础或技术科学层次的控制论和运筹学等分支以及控制工程和系统工程等直接用于解决实际问题的工程技术层次的内容。其后,钱学森又将其总结为“开放的复杂巨系统的方法论——从定性到定量的综合集成法”及其在各方面实际应用的学科体系。以上表明,30多年来钱学森先生从工程控制论到系统科学体系的形成,再次明确了系统工程方法在其中的地位,实现了一个重大的飞跃。

现时人们的思想方式要实现自然科学与社会科学相结合的变革,在研究方向上体现自然科学和社会科学的交叉研究,这种自然科学与社会科学在更高层次上的融合,正好反映在开放的复杂巨系统及其方法论的学说当中。

4 思维(认知)科学、智能科学、计算科学在方法论研究上的成果

从其开始作为方法论,就是建立在思维(认知)科学的基础上,并以人工智能为主要手段而建立的。对从定性到定量的综合集成法钱学森始终强调人机结合,但随着国内外认知心理学研究的进展和系统工程实践,人机结合的学术思想逐步深入,并发展到现时以人为主的观

点,同时得到国际上的共识。

4.1 思维(认知)科学与人工智能

1993 年在美国华盛顿,由美国科学基金委员会组织了一次有 30 个大学约 100 位专家参加的思维(认知)科学教育会议。会上对于思维(认知)科学有一致的看法:思维(认知)科学是研究人的智能(intelligence 在海峡两岸分别译为智能与智慧)、其他动物的智能及人造系统的智能的科学。研究内容包括:感知、学习、记忆、知识、语义、推理、语言、注意、意识及思维等。由于这门科学具有多学科交叉的性质,人们从心理学、计算机科学、神经科学、数学、语言学、哲学等不同的领域进行有关的研究。

人的智能的研究牵涉到脑的功能、意识与思维等十分复杂的问题。应该说:人的大脑神经系统的作用与人的思维、意识是统一的;思维和意识是大脑物质运动的产物,是开放的复杂巨系统的表现。对脑功能、意识与思维的研究,国内外的评论认为有两条道路:一条是研究人脑——脑科学的道路;另一条是从心理学、人工智能和思维(认知)科学着手。

诺贝尔奖获得者、中国科学院外籍院士希蒙(Simon)认为:

思维(认知)科学 = 认知心理学 + 人工智能^[9]

思维(认知)科学,就其产生和发展历程来看,是以电子计算机的发展为其物质、技术基础、以计算机与人脑相类比为前提。认知心理学着重研究利用计算机仿真技术建立人的认知模型,而人工智能则主要研究如何运用人的知识和经验使机器系统,首先是计算机智能化。回顾人工智能 50 年发展的坎坷,借鉴日本研制第五代智能计算机的兴衰,根据笔者参加“863”计划智能计算机主题的体验,可以认为:从思维的深度,以复杂性的观点来研究“智能”是学科发展、融合的必然趋势。因此,人机结合是智能科学发展的必由之路。有鉴于此,根据钱学森先生的指导,笔者于 1994 年在中国科学院第七次院士大会上报告中提出:建立《智能科学与工程(人机的结合)》,对智能科学与工程(人机的结合)的研究任务、方法论和技术路线进行了论述,并对智能科学及工程与其他学科的区别有所界定,从而明确了从定性到定量的综合集成法中,人机结合的重要意义和实施的技术手段^[10]。

4.2 以人为主的计算和智能研究

建立“以人为中心的人机交互环境”是认知和智能研究长期以来的梦想。普适计算技术的出现和发展为以人为中心的人机交互环境赋予了新的涵义,这就是把

人机交互的接口从计算机的面前扩展到人们生活的三维物理空间,交互的方式将适合于人们的习惯并且尽可能少地分散用户的注意力。普适计算技术的发展必将使计算、通信、多媒体等为代表的信息技术无处不在的,渗透到人们生活的各个方面。人们已逐步进入信息社会。信息社会应该是人机和谐的环境,这样才能使信息技术成为人们生活的必需品、成为改善生活质量、提高工作效率和解决社会发展问题的有力工具。建立和谐的人机环境对人机交互学科提出了巨大的挑战,它不但涉及信息技术,而且包括心理学、社会学等广泛领域。因此,建立和谐人机环境呼唤多学科交叉研究,期待着智能技术的突破。

为迎接新世纪的到来,美国国家基金委员会(NSF)召开了一次关于“以人为主的系统与信息、交互和智能”的研讨会,51 位来自不同领域的研究人员齐聚 UIUC,提出了一个完全不同的主题——“人类生活,科学发现方法,技术适应”,并首次提出了以人为中心的计算。2006,2007 年美国国家基金委员会更是连续两年发布题为《信息和智能系统:先进以人为主的计算,信息集成和信息健全智能》的项目申请指南。这也让人们强烈地感到变革前夜的气氛^[11]。

1997 年美国国家基金委员会的研究讨论会尽管明确提出了以人为中心的计算的概念。这表明,钱学森的学术思想的前瞻性,在国际上领先 10 年。

以人为中心的计算方法论有几个特点:

(1) 强调人机集成。以人为中心的计算研究聚焦于人机集成的各个层面:人与软件、人与硬件、人与工作空间、人与人以及机器与机器的交互等等,只要他们对人在系统中的总体系统性能决定性产生影响。

(2) 强调系统观。人和信息处理设备以及所处的环境,即社会,必须看做是一个耦合的三者合一的系统。

(3) 强调社会观。长期以来,思维(认知)科学的一个基本假设就是:人类个体是理解人类智能的合适的分析单元。麻省理工大学的本特兰德(Pentland)则通过实验指出,上述假设存在缺陷,社会网络也是重要的分析单元,而且“社会智能”、“网络智能”很大程度上通过非语言学过程调节。通过社会网络分析可以预测 40% 或者更多的个体行为变化,因而反映出社会性的重要作用。

(4) 强调以人为中心。不同于传统的计算模式,人给计算机提供形式化的问题描述,也不同于以往以人为中心的计算,它与曾经提出的人机交互不同,而是具有更深层次的科学技术与人进一步与社会融合的意义^[12]。

5 信息空间综合集成研讨体系的技术实现

从定性到定量的综合集成法的实践形式之一是从定性到定量的综合集成研讨厅体系(HWME),经过我们多年努力已经建成信息空间综合集成研讨体系(cyber-space for workshop of metasynthetic engineering)。从现代信息和网络的技术角度,信息空间综合集成研讨体系可以视为由专家体系、机器体系和知识体系三者共同构成的一个虚拟工作空间。“厅”的涵义在于:它是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的“厅”,是把专家们和知识库、信息系统、人工智能系统、高速计算机等像作战指挥演示厅那样组织起来,形成一个强大的、人机结合的智能系统。只要具备了必要的技术保障手段,该系统处理复杂问题的能力将远远超过其中的每一位成员。

该系统以信息网络为网络运行环境,作为一个分布式平台,所有的传输和通讯协议均构建于TCP/IP协议之上。在硬件方面,面向宏观经济决策的CWME服务器端采用基于x86的专用工作站,客户端可以是普通PC、笔记本、苹果电脑等任何支持TCP/IP协议和Java运行环境的计算机。在软件方面,采用了基于B/S和C/S的混合结构,软件分为以下层次:人机交互层,主要接受用户的输入,并显示输出结果;应用层,又包括群体智慧的涌现、研讨组织、广义专家、信息过滤、模型支持等多个应用模块;多媒体信息共享层,用于控制和传输多媒体信息(包括语音、视频数据、文本信息和电子白板、应用程序共享等信息);基础设置层,提供底层的数据传输服务,并支持安全传输、目录服务和标准的信息网络协议^[13]。

该系统可应用于宏观经济决策、经济调控方案评估、经济运行态势分析等,可支持数百个专家同时进行讨论,支持自由式、轮流式、抢先式等多种研讨方式。

从定性到定量的综合集成法既体现了“精密科学”从定性判断到精密论证的特点,也体现了以形象思维为主的经验判断到以逻辑为主的精密定量论证过程。所以,这个方法是走精密科学之路的方法论。它的理论基础是认知和思维科学;方法基础是系统科学与数学;技术基础是以计算机为主的信息技术;哲学基础是实践论和认识论。从定性到定量的综合集成法是从整体上研究和解决问题,采取以人为、人机结合的思维方法和研究方式,对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成,达到对整体的定量认识。运用这个方法论研究问题时,也需要进行系统分解,在系统总体指导下进行

分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到整体,如此反复进行达到从信息到知识以及智慧的涌现。如果单独看综合与集成,则综合高于集成。集成比较注重物理意义上的集中和小型化、微型化,主要反映量变(例如集成电路);综合的涵义更广、更深,反映质变,例如人们经常说“综合即创造(也可以说‘综合即创新’)”。综合集成的重点是综合。其前缀meta的涵义是“在……之上”、“在……之外”,这里当取“在……之上”,那么,meta-synthesis就是“在综合之上”、“超越综合”。就是说,综合集成的重点在综合,目的是创造、创新^[14]。

6 从定性到定量的综合集成法研究走向应用

1999年,国家自然科学基金重大项目“支持宏观经济决策的综合集成研讨体系研究”启动。2003年,从定性到定量的综合集成研讨厅体系雏形系统第一版开发完毕,并于同年9月在位于奥地利的国际应用系统分析研究所进行演示,引起各国专家的普遍关注,认为在处理复杂系统方面具有较强的可操作性。2004年,进一步对从定性到定量的综合集成研讨厅体系做出表述,明确了构建处理复杂问题的可操作平台的原则,为从定性到定量的综合集成研讨厅体系的具体化和实用化指明了方向。2005年,我们成功研制了基于信息空间综合集成研讨体系。该项工作被国家自然科学基金委员会(NSFC)评定为特优。

近年来,国际上有关综合、集成以及与此相关的研究,也出现了几个有代表性的重大项目,如美国的定性综合集成的解析方法;欧盟的应急管理项目及日本的未来开拓学术研究计划中的综合的科学等。但是还没有以人为、人机结合从定性到定量的综合集成法。因而这种学说介绍到国外时,受到相当重视。中国参加了维也纳第17届复杂系统建模与集成政策评估方法论及工具研究讨论会(CSM'2003)会议。代表团成员在大会共做了6个报告。演示了一下最新开发的从定性到定量的综合集成研讨厅体系的软硬件系统以及应用该系统解决实际问题的过程。让一些国外专家了解了从定性到定量的综合集成研讨厅体系这一处理开放的复杂巨系统的方法论,并对其巨大的理论潜力和广阔的应用前景有了深刻印象^[15]。可以说钱学森创立的从定性到定量的综合集成法引领了一个时代的科学研究,这种科学方法论更将在科学的交叉、融合发展中,体现其重要作用。

(2009年11月18日收到)

(下转第326页)

nodulation and nitrate-tolerant symbiotic (nts) soybean mutant [J]. *Plant Physiol*, 1985a, 78: 34-40.

- [51] CARROLL B J, MCNEIL D L, GRESSHOFF P M. Isolation and properties of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] mutants that nodulate in the presence of high nitrate concentrations[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1985b, 82: 4162-4166.
- [52] FERGUSON B J, MATHESIUS U. Signaling interactions during nodule development[J]. *J Plant Growth Regul*, 2003, 22: 47-72.
- [53] FERGUSON B J, WIEBE E M, EMERY R J N. Cytokinin accumulation and an altered ethylene response mediate the pleiotropic phenotype of the pea nodulation mutant R50 (sym16) [J]. *Can J Bot*, 2005, 83: 989-1000.
- [54] PENMETSA R V, COOK D R. A legume ethylene-insensitive mutant hyperinfected by its rhizobial symbiont [J]. *Science*, 1997, 275: 527-530.
- [55] PENMETSA R V, URIBE P, ANDERSON J, et al. The *Medicago truncatula* of the *Arabidopsis* EIN2 gene, *sickle*, is a negative regulator of symbiotic and pathogenic microbial interactions[J]. *Plant J*, 2008, 55: 580-595.
- [56] DELVES A, MATHEWS A, DAY D, et al. Regulation of the soybean-Rhizobium symbiosis by shoot and root factors [J]. *Plant Physiol*, 1986, 82: 588-590.

Modern Genetics and Biotechnology of Soybean Nitrogen Fixation and Nodulation

(上接第314页)

- [1] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统(包括社会系统)及其方法论[J]. *自然杂志*, 1990, 13(1).
- [2] 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统[J]. *模式识别与人工智能*, 1991, 4(1).
- [3] 戴汝为. 从定性到定量的综合集成技术[J]. *模式识别与人工智能*, 1991, 4(1).
- [4] 戴汝为. 从定性到定量的综合集成法(Metasyntesis)——开放的复杂巨系统的方法论[R]//刘元亮, 主编. 来自科学前沿的报告. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [5] 王寿云. 军事系统工程[M]//现代作战模拟. 北京: 北京知识出版社, 1984.
- [6] 北京大学现代科学与哲学研究中心. 钱学森与现代科学技术[M]. 北京: 北京人民出版社, 2001.
- [7] 李夏, 戴汝为. 系统科学与复杂性(I)[J]. *自动化学报*, 1998, 24(2).
- [8] 李夏, 戴汝为. 系统科学与复杂性(II)[J]. *自动化学报*, 1998, 24(4).
- [9] 戴汝为. 认知科学(Cognitive Science)进展[J]. *中国科学基金*, 1997, 11(1).
- [10] 戴汝为. 智能科学与工程(人机的结合)[R]//中国科学院第七次院士大会报告摘要汇报, 1994.
- [11] JAIMES A, PREZE D G, SEBE N, et al. Human-centered computing, toward a human revolution [J]. *IEEE Computer*, 2007, 40(5).
- [12] JAIMES A, PRRZE D G, SEBE N, et al. Human-centered computing, a multi-media perspective. ACM international conference multi-media [M]. California: Santa Fe Institute Barbara, 2006.
- [13] 李耀东, 崔霞, 戴汝为. 从定性到定量的综合集成研讨厅体系(Hall for Workshop of Metasyntetic Engineering)的理论框架

GRESSHOFF Peter M.^①, FERGUSON Brett J.^②,
INDRASUMUNAR Arief^③, JIANG Qun-yi^④

① Professor, ②③④ Ph. D., ARC Centre of Excellence for Integrative Legume Research, The University of Queensland, St. Lucia, Brisbane, QLD4072, Australia

Abstract Soybean (*Glycine max*) is a major crop plant important for food supply and animal feed. Belonging to the legume family, it enters a complex symbiosis with soil bacteria called rhizobia, which results in the formation of a new root organ, the nodule. In this fascinating new organ the plant-imprisoned rhizobia convert atmospheric nitrogen gas to valuable nitrogen fertiliser. Careful microbiology has isolated bacterial strains that help final seed yields as seen in Brazil. Modern genetics, biotechnology, physiology, biochemistry and genomics now have allowed the isolation of critical genes for the formation of the nodule. Together these studies indicate a novel molecular mechanism for the induction and subsequent control of cell division. Our research group has cloned the genes of two key soybean receptors for the rhizobial nodulation factor signal as well as molecular components of a complex root-to-shoot-to-root signaling loop involving peptide hormones, receptor kinases and small signaling metabolites. The findings suggest a new age of soybean improvement allowing for increased soybean yields and stress tolerance.

Key words symbiosis, stem cells, nitrogen fertiliser, biofuel, protein supply, sustainability

(责任编辑: 丁嘉羽)

设计与实现[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(1).

- [14] 孙东川, 林福永, 孙凯. 系统工程方法论与方法论系统工程[G]//钱学森系统科学思想研究. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [15] 国家自然科学基金. 宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究[R]. 2004.

The Proposal and Recent Development of Metasyntetic Method(M) from Qualitative to Quantitative

DAI Ru-wei

CAS Member, Complex Systems and Intelligence Science Key Lab, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract The Meta-Synthetic methodology created by Prof. Qianxuesen which processed basic practices with earlier system engineering, especially for military affairs; it was suited demand of system engineering methodology at International; it embodied "science is an entirety of cross and merge from nature science and social science"; it was developed tendency of cognitive science and human-centered computing. Recently, Chinese scientists have constructed the CWME and applied it in some domain, thus have get quite attention from International same occupation.

Key words human-centered, man-machine cooperation, cyberspace for workshop, meta-synthetic engineering

(责任编辑: 方守狮)