

# 纪念钱学森诞辰 100 周年

## 编者按:

2011年12月11日是杰出科学家钱学森先生诞辰100周年纪念日。本刊特别开辟“纪念钱学森诞辰100周年”专栏,并从本期开始陆续刊载纪念文章。在钱老近一个世纪的人生历程和卓越成就中,撷取了部分片段与精华,展现了钱老赤诚的爱国之心,深邃的学术思想,严谨的治学态度,崇高的大师风范。这些文章中蕴含的崇尚科学、追求真理、师生共勉的纯洁而高尚的情怀,弥足珍贵。

本栏目不仅仅诞生在怀念中,更是缅怀与传承的一种存续方式。仰之学,慕之德。在钱老卓然的学识和超凡的人格魅力中,或许每个人都能汲取属于自己的精神财富,作为不断前行的动力。

## 集大成 得智慧 ——钱学森的系统科学成就与贡献

于景元

(中国航天工程咨询中心,北京 100037)

**摘要** 介绍了钱学森科学历程的三大创造高峰:创建物理力学和工程控制论;开创我国火箭、导弹和航天事业,以及系统工程管理方法与技术;建立系统科学及其体系,创建系统学,并开创复杂巨系统科学与技术领域。以钱学森建立的科学技术体系结构为基础,分析了钱学森的系统科学体系、系统学与综合集成方法,以及复杂巨系统科学技术体系。

**关键词** 系统科学;复杂巨系统;综合集成方法;工程控制论

**中图分类号:**V1;N94 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8748(2011)03-0001-11

## Integration of Great Intelligence ——System Science Achievements and Contributions of Qian Xuesen

YU Jingyuan

(China Aerospace Engineering Consulting Center, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The creation peaks of Qian Xuesen's science achievements include creating physical mechanics and engineering cybernetics, setting up the rocket, missile and space project of China, initiating management method and technology of system engineering, and establishing system science and its complex giant system. Based on the science and technology architecture set up by Qian, system science system, Meta-synthesis and science and technology system of complex giant system are analyzed.

**Key words:** system science; complex giant system; meta-synthesis; engineering cybernetics

收稿日期:2011-02-23; 修回日期:2011-04-18

作者简介:于景元(1937—),男,研究员,研究方向为系统科学与系统工程。

今年是钱学森先生诞辰 100 周年,也是钱老离开我们 2 周年。我们深深怀念这位伟大的科学家和思想家。

钱学森的一生是科学的一生、创新的一生和辉煌的一生。在长达 70 多年丰富多彩的科学生涯中,钱学森曾建树了许多科学丰碑,对现代科学技术发展和我国社会主义现代化建设作出了巨大贡献。钱老对我国火箭、导弹和航天事业的开创性贡献,是众所周知的,人们称他为“中国航天之父”。但从钱学森全部科学成就与贡献来看,这只是其中的一部分。实际上,钱老的研究领域十分广泛,从工程、技术、科学直到哲学的不同层次上,在跨学科、跨领域和跨层次的研究中,特别是不同学科、不同领域的相互交叉、结合与融合的综合集成研究方面,都作出了许多开创性贡献。钱老在这些方面的科学成就与贡献,从现代科学技术发展来看,其意义和影响可能更大也更深远。

## 1 钱学森科学历程中的三大创造高峰

钱学森的科学历程大体上可分为三个阶段。第一个阶段是从 20 世纪 30 年代中到 50 年代中。这 20 年是在美国度过的,主要从事自然科学技术研究,特别是在应用力学、喷气推进以及火箭与导弹研究方面,取得了举世瞩目的成就。与此同时还创建了物理力学和工程控制论,成为当时国际上著名的科学家,这些成就与贡献形成了钱老一生中第一个创造高峰。

值得指出的是,从现代科学技术发展来看,工程控制论已超出了自然科学领域,而属于系统科学范畴。自然科学是从物质在时空中运动的角度来研究客观世界的。但工程控制论要研究的并不是物质运动本身,而是研究代表物质运动的事物之间的关系,研究这种关系的系统性质,以及如何控制系统使其具有我们所期望的功能。因此,系统和系统控制是工程控制论所要研究的基本问题。

钱学森创建工程控制论表明,在这个时期钱老已开始进行跨学科、跨领域的研究,并取得了重要成就。《工程控制论》一书的出版,在国际学术界引起了强烈反响,立即被译成多种文字出版发行。工程控制论所体现的系统科学思想、理论方法与应用,直到今天仍然深刻地影响着系统科学与系统工程、控制科学与工程以及管理科学与工程等的发展。

第二阶段是 20 世纪 50 年代中至 80 年代初。这

一时期钱老的主要精力集中在开创我国火箭、导弹和航天事业上。这个时期的工作更多是工程实践,要研制和生产出型号产品来。航天科学技术与工程具有高度的综合性,需要广泛应用自然科学领域中多种学科和多类技术,并综合集成到工程实践中。

由于钱学森在自然科学技术领域中的渊博知识以及高瞻远瞩的科学智慧,使他始终处在这一事业的“科技主帅”位置上。在周恩来、聂荣臻等老一辈无产阶级革命家的直接领导下,钱学森的科学才能和智慧得以充分发挥,并和广大科技人员一起,在当时十分艰难的条件下,研制出我国自己的导弹和卫星来,创造出国内外公认的奇迹,这是钱老一生中第二个创造高峰。

这里需要强调的是,以“两弹一星”为代表的大规模科学技术工程,如何把成千上万人组织起来,并以较少的投入在较短的时间内,研制出高质量、高可靠的型号产品来,这就需要有一套科学的组织管理方法与技术,在当时这是一个十分突出的问题。钱学森在开创我国航天事业过程中,同时也开创了一套既有中国特色又有普遍科学意义的系统工程管理方法与技术。

当时,在研制体制上是研究、规划、设计、试制、生产和试验一体化;在组织管理上是总体设计部和两条指挥线的系统工程管理方式。实践已证明了这套组织管理方法是十分有效的。从今天来看,就是在当时条件下,把科技创新、组织管理创新与体制机制创新有机结合起来,实现了综合集成创新,从而走出了一条发展我国航天事业的自主创新道路。我国航天事业一直在持续发展,现已发展到了载人航天和探月阶段,其成功的根本原因就在于自主创新。

航天系统工程的成功实践,证明了工程科学的科学性和有效性,而且不仅适用于自然工程,其原理同样也适用于社会工程,开创了大规模工程系统管理的典型范例。系统工程的应用与实践也是钱老对管理科学与工程的重大贡献。

第三阶段是 20 世纪 80 年代初到逝世前。80 年代初,钱老从科研一线领导岗位上退下来以后,就把自己全部精力投入到学术研究之中。这一时期,钱老学术思想之活跃、涉猎领域之广泛,原创性之强,在学术界是十分罕见的。他通过讨论班、学术会议以及众多专家、学者书信往来的学术讨论中,提出了许多创新的学术思想和方法、新的学科与领域,并发表了大量文章,出版了多部著作,产生了广泛的学术影响。这些成就与贡献也就形成了钱老一生中

第三次创造高峰。

在这个阶段,钱老花费心血最多、也最具有代表性的是他建立系统科学及其体系和创建系统学的工作,并开创了复杂巨系统科学与技术这一新的科学领域。钱老不仅善于从各学科、各领域吸收营养来构建系统科学体系,发展系统科学,而且又能从综合集成思想和系统科学角度去思考一些学科和领域的发展,从而提出新的学科和新的领域。如把人脑作为复杂巨系统来研究,提出了“思维科学”;把地球表层作为复杂巨系统来研究,提出了“地理科学”;把人体作为复杂巨系统来研究,提出了“人体科学”等等。而且这些新的学科和领域不仅和原来相关的学科和领域是相洽的,同时还融入了新的科学思想和科学方法。

在钱学森的科学理论与科学实践中,有一个非常鲜明的特点,就是他的系统思维和系统科学思想。系统科学思想贯穿于钱老的整个科学历程中,在这个阶段上,钱学森的系统科学思想和系统方法有了新的发展,达到了新的高度,进入了新的阶段。特别是钱学森的综合集成思想和综合集成方法,已贯穿于工程、技术、科学直到哲学的不同层次上,形成了一套综合集成体系。综合集成思想与综合集成方法的形成与提出,是一场科学思想和科学方法上的革命,其意义和影响将是广泛而深远的,就现实而言,也具有极为重要的实践意义。

钱学森在系统科学及其不同层次上,都作出了开创性贡献并有相应著作出版。在工程技术层次上有“论系统工程”,在技术科学层次上有“工程控制论”,在基础理论层次上有“创建系统学”。从这些著作中,我们可以学习和研究钱学森的系统科学思想、系统方法、系统理论、系统技术与系统应用。这些著作曾经培育和影响了几代在这个领域中从事研究工作的专家、学者。今后也会有更多的青年学者进入这个领域进行研究,并把钱老所开创的科学事业继续发展下去并发扬光大。

2 从工程控制论到系统科学体系

钱学森创建工程控制论和开创中国航天事业的系统工程实践,为建立系统科学体系提供了雄厚和坚实的理论基础和实践基础。而钱老一直坚持辩证唯物主义,又为此奠定了哲学基础。

20 世纪 70 年代末 80 年代初,钱老花费很大精力,一方面研究和总结国内外有关系统研究和系统

实践的进展和发展态势,另一方面又从系统角度从整体上去研究现代科学技术发展的体系结构,并从其他科学技术部门如自然科学、社会科学、数学科学、军事科学、地理科学等吸取营养来构建系统科学体系。这些科学技术部门虽然不直接以系统为研究对象,但却从中揭示了很多系统规律。

根据现代科学技术的发展,钱学森提出了现代科学技术体系和人类知识体系,钱老在构建现代科学技术体系时,把科学技术分为工程技术或应用技术、技术科学、基础科学和哲学四个层次<sup>[1]</sup>。辩证唯物主义处在这个体系的最高端,它是人类知识的最高概括,也是人类智慧的最高结晶。既用它来指导科学技术的研究,又随着科学技术进步而不断丰富和发展。这也是钱老一直坚持的重要学术思想,使哲学建立在科学基础上,把哲学和科学统一起来,把理论和实践统一起来。

科学是认识世界的学问,技术是改造世界的学问,工程是改造世界的实践。从这样三个层次来看,现代科学技术已有了巨大发展,人类对客观世界的认识越来越深刻,改造客观世界的能力也越来越强。今天,科学技术对客观世界的研究与探索,已从渺观、微观、宏观、宇观直到胀观五个层次的时空范围<sup>[2]</sup>,可用图 1 来表示。其中,宏观层次就是我们所在的地球,在地球上出现了生命、生物,产生了人类和人类社会。相应于这些不同领域和不同层次的研究,也就形成了今天众多的学科和科学领域。



图 1 时空范围  
Fig. 1 Space-time scale

钱学森从系统科学思想出发,从整体上建立了现代科学技术体系结构,在这个体系中,不同领域、不同学科、不同层次的知识,相互关联、相互影响、共居一体,而且这个体系是开放的,随着科学技术的发展,这个体系也要发展(见图 2)。

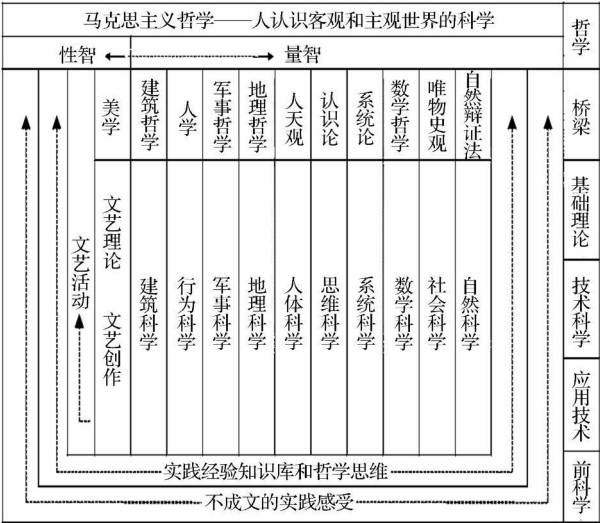


图 2 科学技术体系结构

Fig.2 System architecture of science and technology

综合起来可以看出，钱老在建立系统科学及其体系结构时，既有系统领域研究的深度，又有跨领域、跨学科的广度，还有跨层次的高度。这样三维知识结构的优势，是一般科学家所不具备的，而钱老具有这个优势，钱学森是一位既有深度又有广度还有高度的三维科学家。

对于系统科学，20 世纪 80 年代初，钱老就明确指出，系统科学是从事物的整体与部分、局部与全局以及层次关系的角度来研究客观世界的<sup>[1]</sup>。客观世界包括自然、社会和人自身。能反映事物这个特征最基本和最重要的概念就是系统，所谓系统是指由一些相互关联、相互作用、相互影响的组成部分构成并具有某些功能的整体。系统是系统科学研究和应用的基本对象，而系统观点和系统思想与方法论也就成为系统科学研究客观世界的基本着眼点和出发点。

系统科学与自然科学、社会科学等不同，但有深刻的内在联系。系统科学能把这些科学领域研究的问题联系起来作为系统进行综合性和整体性研究，这就是为什么系统科学具有交叉性、综合性、整体性与横断性的原因，这也是系统科学区别于其他科学技术部门的一个显著特点。

系统科学是现代科学技术体系中如同自然科学、社会科学等一样，也是一个科学技术部门，因而也有四个层次的知识结构。在钱老建立的系统科学体系中，处在工程技术或应用技术层次上的是系统工程，这是直接用来改造客观世界的工程技术，但和其他工程技术不同，它是组织管理技术。

在系统科学体系中，处在技术科学层次上直接

为系统工程提供理论方法的有运筹学、控制论、信息论等；而处在基础科学层次上属于系统理论的，便是系统学(Systematology)和复杂巨系统学。系统学和复杂巨系统学都是揭示客观世界中系统普遍规律的基础科学，这是需要建立的一类新兴学科。

这样三个层次结构的系统科学，经过系统论(Systematics)通向辩证唯物主义。系统论属于哲学层次，是连接系统科学与辩证唯物主义的桥梁。一方面辩证唯物主义通过系统论去指导系统科学的研究、应用与发展；另一方面系统科学的发展，经系统论的提炼又丰富和发展了辩证唯物主义。这是一种双向互动关系。

关于系统论，钱老曾明确指出：“我们所提倡的系统论，既不是整体论，也非还原论，而是整体论与还原论的辩证统一。”<sup>[3]</sup>钱老的这个系统论思想后来发展成为他的综合集成思想，这也显示出钱学森的辩证唯物主义哲学智慧。根据这个思想，钱老又提出将还原论方法与整体论方法辩证统一起来，形成了系统论方法，这就为钱老提出的综合集成方法奠定了哲学和方法论基础。

系统研究曾经吸引了国内外众多领域的专家学者，他们从各自专业角度使用他们认为适合的名称，一度比较混乱，正如许国志院士所说的：“人各一词，莫衷一是”。钱老建立的系统科学体系层次分明，不仅指明了已有学科的层次归属，还指出了进一步发展的方向，使上述局面变成为“分门别类，共居一体”，这对系统科学的发展具有重大意义。

系统科学及其体系不仅具有重要理论价值，还有重要的实践意义。从实践论观点来看，任何社会实践，特别是复杂的社会实践，都有明确的目的性和组织性。要清楚做什么，为什么要做，能不能做以及怎样做才能做的最好。社会实践又具有高度的综合性、系统性和动态性，特别是复杂的社会实践这些特点就更为突出。

社会实践要在理论指导下才有可能取得成功。这个理论就是现代科学技术体系和人类知识体系所提供的知识和智慧。处在这个体系最高端的是辩证唯物主义，所以社会实践首先应受辩证唯物主义的指导。但仅有哲学层次上的指导还不够，还需要有科学技术层次上各个科学技术部门、不同科学部门的科学理论方法和应用技术，甚至需要前科学层次上的经验知识和感性知识的指导和帮助。

如何把不同科学技术部门、不同层次的知识综合集成起来，形成指导社会实践的理论方法和技术，

以解决社会实践中的问题,这就有个方法论和方法问题。后面将会看到,钱老提出的系统集成方法可以处理这类问题。

社会实践通常包括三个重要组成部分:第一个是实践对象,指的是实践中干什么,它体现了实践的目的性;第二个是实践主体,指的是由谁来干,如何来干,它体现了实践的组织性;第三个就是决策主体,它最终要决定干不干,由谁来干并干得最好。

从系统科学观点来看,任何一项社会实践或工程,都是一个具体的实际系统,是有人参与的实际系统。实践对象是个系统,实践主体也是系统,且人在其中,把两者结合起来还是个系统。因此,社会实践是系统的实践,也是系统的工程。这样一来,有关实践或工程的决策与组织管理等问题,也就成为系统的决策与组织管理问题。在这种情况下,系统论思想、系统科学的理论方法和技术应用到社会实践或工程的决策与管理之中,不仅是自然的,也是必然的。从这里便可以看出,系统论、系统科学对社会实践或工程具有极其重要的意义和价值。这也就是为什么系统工程和系统科学具有广泛的应用性。同样,正是社会实践的迫切需要,也推动了系统工程和系统科学的发展。

### 3 创建系统学与系统集成方法

在系统科学体系中,系统工程已应用于实践中并取得显著成效;运筹学、控制论、信息论等也有了各自的理论方法,并处在发展之中。但系统学、复杂巨系统学却是需要建立的新兴学科,这也是钱老最早提出来的。讨论班的形式是钱老从事学术研究常用的方法。在他提出建立系统学之后不久,就想以系统学讨论班的方式,来开展系统学和系统科学的研究工作,并培养这方面的研究人才和队伍。

1986年1月7日,“系统学讨论班”开始了学术活动,从1986到1992年的7年时间里,钱老参加了讨论班的全部学术会议。在这次讨论会上,钱老亲自作了关于建立系统学的学术报告。在这次报告中,他从现代科学技术体系结构讲到系统科学体系结构;从系统工程讲到运筹学、控制论、信息论,再到系统学。关于如何建立系统学,20世纪80年代初他曾提出:“我认为把运筹学、控制论和信息论同贝塔朗菲、普利高津、哈肯、弗洛里希、艾肯等人的工作融会贯通,加以整理,就可写出这本书”。

在以上这些学术讨论中,钱老首先提出了新的

系统分类。

系统在自然界、人类社会包括人自身是普遍存在的,因而现实中存在着各种各样的系统,这样也就有了各种各样的系统分类。例如,自然系统与人工系统,生命系统与非生命系统,物理系统、生物系统、生态系统、社会系统等等。这样的系统分类比较直观,其着眼点是放在系统的具体内涵上,但却失去了对系统本质的刻画。

系统很重要的一个特点是复杂性,但复杂性是有层次的。普利高津探索的复杂性是物理化学系统中的复杂性,而美国桑塔菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)科学家们的复杂性研究,却是生物系统、经济系统、人脑系统,乃至社会系统中的复杂性,同为复杂性,但全然不在同一层次上。

正是基于复杂性层次的不同,钱老提出了新的系统分类,其着眼点是系统结构的复杂性。这里,一个是子系统的数量和种类;另一个是子系统之间相互关系的复杂程度(非线性、不确定性、模糊性等)以及系统的层次结构。

从这个角度出发,钱老将系统分为简单系统、简单巨系统、复杂巨系统和特殊复杂巨系统。如生物体系统、人体系统、人脑系统、地理系统、社会系统、星系系统等都是复杂巨系统。其中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,与外部环境有物质、能量和信息的交换,所以又称为开放的复杂巨系统。

钱学森的系统分类具有极为重要的理论和实践意义。近20多年来,复杂性研究引起了国内外一些专家、学者的重视,但至今不同学科、不同领域的专家、学者,对于复杂性的认识还不一致,众说纷纭,莫衷一是。

在1999年出版的美国《科学》(Science vol. 284)杂志上,有一组文章讨论复杂性问题,采用了“复杂系统”一词作为标题。文中说:“本专题回避了一个术语上的雷区,部分原因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。”

看来国外科学家们也意识到要把复杂性研究和系统结合起来。但在复杂性问题上,钱学森和他们不同,钱老不是从复杂性的抽象定义出发,而是从实际出发,从方法论角度来区分复杂性和简单性问题。如果仅从概念出发,不仅难以统一认识,甚至会抓不住事物本质,反而把复杂性简单化,或把简单性复杂

化了。例如在国外,把一个层次的问题如混沌,即使是混沌中比较复杂的问题,像无穷维的 Navier-Stokes 方程所决定的湍流以及自旋玻璃等,他们都叫复杂性问题。但钱老认为,这种复杂性其实并不复杂,还是属于有路可循的简单性问题。正是从方法论出发,钱老在 20 世纪 90 年代初就指出:“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”<sup>[4]</sup>。他还进一步指出,桑塔菲研究所对复杂性的研究,实际上是开放的复杂巨系统的动力学问题。这样,钱老就从系统角度,给出了复杂性一个清晰和具体的描述。

对于所有系统来说,它的一个重要特点,就是系统在整体上可以具有其组成部分(或子系统)所没有的性质,这就是系统的整体性。系统整体性的外在表现就是系统功能。系统内部结构和系统外部环境以及它们之间关联关系,决定了系统整体性和功能。

从理论上来看,系统结构与系统环境如何决定系统整体性与功能,揭示系统存在、演化、协同、控制与发展的一般规律,就成为系统学特别是复杂巨系统学要研究的基本问题。国外关于复杂性研究是开放复杂巨系统的动力学问题,实际上属于系统理论范畴,也包含在系统学和复杂巨系统学的研究之中。

另一方面,从应用角度来看,根据上述性质,为了使系统具有我们期望的功能,特别是最好的功能,我们可以通过改变和调整系统结构或系统环境以及它们之间关联关系来实现。但系统环境并不是我们想改变就能改变的,在不能改变的情况下只能主动去适应。而系统结构却是我们能够改变、调整和设计的。这样,我们便可以通过改变和调整系统组成部分、组成部分之间、层次结构之间以及与系统环境之间的关联关系,使它们相互协调与协同,从而在整体上涌现出我们满意的和最好的功能,这就是系统管理、系统控制、系统干预(Intervention)的基本内涵,也是系统工程、控制工程等所要实现的主要目标。

20 世纪 80 年代末,在讨论班的基础上,钱老明确界定系统学是研究系统结构与功能(系统演化、协同与控制)一般规律的科学。把控制的思想与概念引入到系统学,是钱老的一个重要学术思想。系统学不仅要揭示系统规律去认识系统,而且还要在认识系统的基础上去控制系统,以使系统具有我们期望的功能。正如同我们认识客观世界的目的,是为

了更好地适应和改造客观世界。

钱老对系统学的这个概括,比 20 世纪 80 年代初对系统学的认识又深化了一大步。如果说 80 年代初对系统学的认识重点,还是在简单系统和简单巨系统上的话,那么 80 年代末则发展到开放的复杂巨系统和社会系统。后来,钱老又把这部分内容称作复杂巨系统学。以这些概念和思想为核心,就形成了简单系统、简单巨系统、复杂巨系统和特殊复杂巨系统(社会系统)为主线的系统学基本框架,构成了系统学的主要内容,奠定了系统学的科学基础,指明了系统学的研究方向。许国志院士生前主编的《系统科学》一书(上海科技教育出版社 2000 年版),关于系统理论部分就是参照这一框架编写的。

钱学森不仅提出了开放的复杂巨系统概念,同时还提出了处理这类系统的方法论和方法,从而开创了复杂巨系统的科学与技术这个新的科学领域。对于简单系统和简单巨系统均已有了相应的方法论和方法,但对复杂巨系统和社会系统却不是已有方法论和方法所能处理的,需要有新的方法论和方法。

从近代科学到现代科学的发展过程中,自然科学采用了从定性到定量的研究方法,所以自然科学被称为“精密科学”。而社会科学、人文科学等由于研究问题的复杂性,通常采用的是从定性到定性的思辨、描述方法,所以这些学问被称为“描述科学”。当然,这种趋势随着科学技术的发展也在变化,有些学科逐渐向精密化方向发展,如经济学、社会学等。

从方法论角度来看,在这个发展过程中,还原论方法发挥了重要作用,特别在自然科学领域中取得了很大成功。还原论方法是把所研究的对象分解成部分,以为部分研究清楚了,整体也就清楚了。如果部分还研究不清楚,再继续分解下去进行研究,直到弄清楚为止。按照这个方法论,物理学对物质结构的研究已经到了夸克层次,生物学对生命的研究也到了基因层次。毫无疑问,这是现代科学技术取得的巨大成就。但现实的情况却使我们看到,认识了基本粒子还不能解释大物质构造,知道了基因也回答不了生命是什么。这些事实使科学家认识到“还原论不足之处正日益明显”。这就是说,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,但由下往上回不来,回答不了高层次和整体问题,又是它的不足一面。所以仅靠还原论方法还不够,还要解决由下往上的问题,也就是复杂性研究中的所谓涌现问题。著名物理学家李政道对于 21 世纪物理学的发展,曾讲过“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、大型量子态结合起来,这些很可能是21世纪的研究目标”<sup>[5]</sup>。这里所说的把宏观和微观结合起来,就是要研究微观如何决定宏观,解决由下往上的问题,打通从微观到宏观的通路,把宏观和微观统一起来。

同样的道理,还原论方法也处理不了系统整体性问题,特别是复杂系统和复杂巨系统以及社会系统的整体性问题。从系统角度来看,把系统分解为部分,单独研究一个部分,就把这个部分和其他部分的关联关系切断了。这样,就是把每个部分都研究清楚了,也回答不了系统整体性问题。

意识到这一点更早的科学家是贝塔朗菲,他是一位分子生物学家,当生物学研究已经发展到分子生物学时,用他的话来说,对生物在分子层次上了解的越多,对生物整体反而认识的越模糊。在这种情况下,于20世纪30年代他提出了整体论方法,强调还是从生物体系统的整体上来研究问题。但限于当时的科学技术水平,支撑整体论方法的具体方法体系没有发展起来,还是从整体论整体、从定性到定性,论来论去解决不了问题。正如钱老所指出的那样,“几十年来一般系统论基本上处于概念的阐发阶段,具体理论和定量结果还很少”。但整体论方法的提出,确是对现代科学技术发展的重大贡献。

20世纪80年代中期,国外出现了复杂性研究。所谓复杂性,实质上都是系统复杂性,从这个角度来看,系统整体性,特别是复杂系统和复杂巨系统,以及社会系统的整体性问题,就是复杂性问题。因此,对复杂性研究,后来国外也采用了“复杂系统”一词。

国外关于复杂性和复杂系统的研究,在研究方法上确实有许多创新之处,如他们提出的遗传算法、演化算法、开发的Swarm软件平台、以Agent为基础的系统建模、用数字技术描述的人工生命等等。在方法论上,虽然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。方法论是关于研究问题所应遵循的途径和研究路线,在方法论指导下是具体方法问题,如果方法论不对,再好的方法也解决不了根本性问题。

如前所述,20世纪80年代初钱学森就明确地提出了系统论和系统论方法,这是方法论上的重大发展。在应用系统论方法时,也要从系统整体出发将系统进行分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到系统整体,实现 $1+1>2$ 的整体涌现,最终是从整体上研究和解决问题。由此可见,系统论方法吸

收了还原论方法和整体论方法各自的长处,同时也弥补了各自的局限性,既超越了还原论方法,又发展了整体论方法。这是钱学森在科学方法论上具有里程碑意义的贡献,它不仅大大促进了系统科学的发展,同时也必将对自然科学、社会科学等其他科学技术部门产生深刻的影响。

钱老不仅提出了系统论方法,同时还提出了实现系统论方法的具体方法体系和实践方式,建立了一套方法论体系。

这里特别值得说明的是,钱老在20世纪80年代末研究信息革命时就指出,以计算机、网络和通信技术为核心的信息技术革命,不仅对人类社会的影响将导致一场新的产业革命(第五次产业革命),而且对人自身,特别对人的思维会产生重要影响,将出现人·机结合的思维方式,人将变得更加聪明。

我们知道,人类有史以来是通过人脑获得知识和智慧的,但现在由于以计算机为主的现代信息技术的发展,出现了人·机结合、人·网结合、以人为为主的思维方式、研究方式和工作方式,这在人类发展史上是具有重大意义的进步,对人类社会的发展必将产生深远的影响。正是在这种背景下,钱老提出了人·机结合、以人为为主的思维方式和研究方式。

从思维科学角度来看,人脑和计算机都能有效处理信息,但两者有极大差别。人脑思维一种是逻辑思维(抽象思维),它是定量、微观处理信息的方式;另一种是形象思维,它是定性、宏观处理信息的方式。而人的创造性主要来自创造思维,创造思维是逻辑思维与形象思维的结合,也就是定性 with 定量相结合,宏观与微观相结合,这是人脑创造性的源泉。

今天的计算机在逻辑思维方面确实能做很多事情,甚至比人脑做的还好、还快,善于信息的精确处理,已有很多科学成就证明了这一点。如著名数学家吴文俊先生的定理机器证明,就是这方面的一项杰出成就。而在形象思维方面,现在的计算机还不能给我们以任何帮助,也许今后这方面有了新的发展,情况将会变化。至于创造思维就只能依靠人脑了。

但计算机在逻辑思维方面毕竟有其优势,如果把人脑和计算机结合起来以人为主,那就更有优势,人将变得更加聪明,它的智能比人要高,比机器就更高,这也是 $1+1>2$ 的道理。这种人·机结合、以人为为主的思维方式、研究方式和工作方式,具有更强的创造性,也具有更强的认识世界和改造世界的能力。由图3来说明这一点。

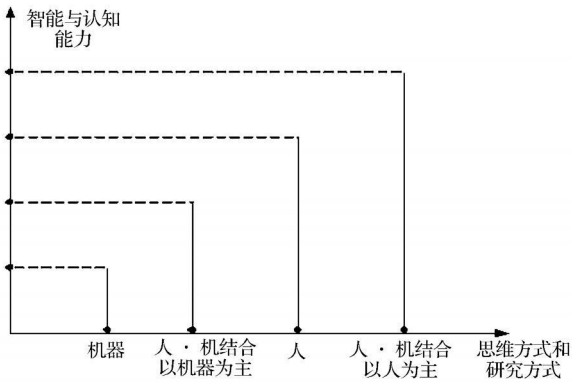


图 3 思维方式、研究方式与认知能力关系  
Fig. 3 Relation of ideation, analysis and cognition

从图 3 可以看出,人·机结合、以人为主的思维方式,它的智能和认知能力处在最高端。这种聪明人的出现,预示着将出现一个“新人类”,不只是人,是人·机结合的新人类。

正是在思维科学和信息技术进展的基础上,20 世纪 80 年代末到 90 年代初,钱学森又先后提出“从定性到定量综合集成方法”以及它的实践形式“从定性到定量综合集成研讨厅体系”(将两者合称为综合集成方法,Meta-synthesis),钱老也将此称为大成智慧工程,并将运用这套方法的集体称为总体设计部。这就将系统论方法具体化了,形成了一套可以操作的行之有效的体系和实践方式。

从方法和技术层次上看,它是人·机结合、人·网结合、以人为主的信息、知识和智慧的综合集成技术。从应用和运用层次上看,是以总体设计部为实体进行的综合集成工程。这就将前面提到的人·机结合、以人为主的思维方式和研究方式具体实现了。

综合集成方法的实质是把专家体系、信息与知识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·机结合与融合体系,这个体系具有综合优势、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。综合集成方法就是人·机结合获得信息、知识和智慧的方法,它是人·机结合的信息处理系统,也是人·机结合的知识创新系统,还是人·机结合的智慧集成系统。

从实践论和认识论角度来看,与所有科学研究一样,无论是复杂系统、复杂巨系统和社会系统的理论研究还是应用研究,通常是在已有的科学理论、经验知识基础上与专家判断力(专家的知识、智慧和创造力)相结合,对所研究的问题提出和形成经验性假设,如猜

想、判断、思路、对策、方案等等。这种经验性假设一般是定性的,它所以是经验性假设,是因为其正确与否,能否成立还没有用严谨的科学方式加以证明。

在自然科学和数学科学中,这类经验性假设是用严密逻辑推理和各种实验手段来证明的,这一过程体现了从定性到定量的研究特点。但对复杂系统、复杂巨系统和社会系统,由于其跨学科、跨领域、跨层次的特点,对所研究的问题能提出经验性假设,通常不是一个专家,甚至也不是一个领域的专家们所能提出来的,而是由不同领域、不同学科的专家构成的专家体系,依靠专家群体的知识和智慧,对所研究的复杂系统、复杂巨系统和社会系统问题提出经验性假设。

但要证明其正确与否,仅靠自然科学和数学中所用的各种方法就显得力所不及了。如社会系统、地理系统中的问题,既不是单纯的逻辑推理,也不能进行科学实验。但我们对经验性假设又不能只停留在思辨和从定性到定性的描述上,这是社会科学、人文科学中常用的方法。系统科学是要走“精密科学”之路的,那么出路在哪里?这个出路就是人·机结合、以人为主的思维方式和研究方式。

采取“机帮人、人帮机”的合作方式,机器能做的尽量由机器去完成,极大扩展人脑逻辑思维处理信息的能力。通过人·机结合、以人为主,实现信息、知识和智慧的综合集成。这里包括了不同学科、不同领域的科学理论和经验知识、定性和定量知识、理性和感性知识,通过人·机交互、反复比较、逐次逼近,实现从定性到定量的认识,从而对经验性假设的正确与否做出明确结论。无论是肯定还是否定了经验性假设,都是认识上的进步,然后再提出新的经验性假设,继续进行定量研究,这是一个循环往复、不断深化的研究过程。

综合集成方法的运用,是专家体系的合作以及专家体系与机器体系合作的研究方式与工作方式。具体来说,是通过从定性综合集成到定性定量相结合综合集成,再到从定性到定量综合集成这样三个步骤来实现的。这个过程不是截然分开,而是循环往复、逐次逼近的。

这套方法是目前处理复杂系统和复杂巨系统以及社会系统的有效方法,已有成功的案例说明了它的有效性。综合集成方法的理论基础是思维科学,方法基础是系统科学与数学科学,技术基础是以计算机为主的现代信息技术和网络技术,哲学基础是辩证唯物主义的实践论和认识论。



## 4 开创复杂巨系统科学技术体系

从方法论和方法特点来看,综合集成方法本质上是用来处理跨学科、跨领域、跨层次问题研究的方法论与方法,这个方法对系统科学体系不同层次及其应用都将产生重要影响,从而推动了系统科学体系的整体发展。从知识创新角度来看,总体设计部和综合集成方法是知识创新主体,但和一般知识创新主体不同,它是进行跨学科、跨领域、跨层次研究并实现综合集成创新的知识创新主体。既可以进行科学创新,建立综合集成理论,也可以进行技术创新,发展综合集成技术,还可以进行应用创新,用于综合集成工程。由于科学、技术与工程三个层次面临的问题性质不同,所以总体设计部与综合集成方法中的专家体系结构与研讨厅体系结构也就不会一样,但方法论却是同一的。

20世纪90年代中,钱老在祝贺中国系统工程学会第8届学术年会的贺词中,提出开创复杂巨系统的科学与技术<sup>[6]</sup>。在科学层次上,对于开放的复杂巨系统的理论研究,属于复杂巨系统学的内容。运用综合集成方法所形成的理论就是综合集成的系统理论,复杂巨系统学就是要建立这套理论。

钱学森指出,对于开放的复杂巨系统的研究,目前还没有形成从微观到宏观的理论,也没有从子系统的相互作用构建出来的统计力学,但有了研究这类系统的方法论,就可以逐步建立起理论。他还明确指出,要建立开放的复杂巨系统的一般性理论,必须从研究一个一个具体的开放的复杂巨系统入手,只有这些研究成果多了,才能从中提炼出开放复杂巨系统的一般理论。

应用综合集成方法在科学层次上可以建立起复杂巨系统理论。同样,应用综合集成方法在技术层次上可以发展复杂巨系统技术。在这方面比较典型的是系统工程技术的发展,这也是钱老一直大力倡导和推动的。

系统工程是组织管理系统的技术。它根据系统总体目标的要求,从系统整体出发,运用综合集成方法把与系统有关的科学理论方法与技术综合集成起来,对系统结构、环境和功能进行总体分析、总体论证、总体规划、总体设计和总体协调,其中包括系统建模、仿真、分析、优化、设计与评估,以求得可行的、满意的或最好的系统方案并付诸实施。

由于实际系统不同,将系统工程用到哪类系统

上,还要用到与这个系统有关的科学理论方法与技术。例如,用到社会系统上,就需要社会科学与人文学等方面的知识。从这些特点来看,系统工程不同于其他技术,它是一类综合性的整体技术、一种综合集成的系统技术、一门整体优化的定量技术。它体现了从整体上研究和解决系统管理问题的技术方法。

系统工程的应用首先是从工程系统开始的,用来组织管理工程系统的研究、规划、设计、制造、试验和使用。实践已证明了它的有效性,如航天系统工程。直接为这类工程系统工程提供理论方法的有运筹学、控制论、信息论等,当然还要用到自然科学等有关的理论方法与技术。所以,对工程系统工程来说,综合集成也是其基本特点,只不过处理起来相对容易一些。

当系统工程用来组织管理复杂巨系统和社会系统时,处理工程系统的方法已不够用了,它难以用来处理复杂巨系统和社会系统的组织管理问题。在这种情况下,系统工程也要发展。由于有了综合集成方法,系统工程便可以用来组织管理复杂巨系统和社会系统了。这样,系统工程也就发展了,现已发展到复杂巨系统工程和社会系统工程阶段。

在前文中已指出,任何一项社会实践,特别是复杂的社会实践或工程,都是系统的实践或系统的工程。运用综合集成方法形成的理论和技术,并用于改造客观世界的实践就是综合集成工程。我们所面临的大量社会实践,特别是复杂的社会实践,其实都是综合集成工程,它不是一种理论和一种技术所能处理和解决的。

人们在遇到涉及的因素多而又难于处理的社会实践或工程问题时,往往脱口而出的一句话就是:这是系统工程问题。这句话是对的,其实它包含两层含义:一层含义是从实践或工程角度来看,这是系统的实践或系统的工程;另一层含义是从技术角度来看,既然是系统的工程或实践,它的组织管理就应该直接用系统工程技术去处理,因为工程技术是直接用来改造客观世界的。可惜的是,人们往往只注意到了前者,相对于没有系统观点的实践来说,这也是个进步,但却忽视和忘记了要用系统工程技术去解决问题。结果就造成了什么都是系统工程,但又什么也没有用系统工程的局面。

要把系统工程技术应用到实践中,就必须有个运用它的实体部门。我国航天事业的发展,就是成功地应用了系统工程技术。航天系统中每种型号都是一个工程系统,对每种型号都有一个总体设计部,总体设计部由熟悉这个工程系统的各方面专业人员

组成,并由知识面比较宽广的专家(称为总设计师)负责领导。根据系统总体目标要求,总体设计部设计的是系统总体方案,是实现整个系统的技术途径。总体设计部把系统作为它所从属的更大系统的组成部分进行研制,对它所有技术要求,都首先从实现这个更大系统的技术协调来考虑;总体设计部又把系统作为若干分系统有机结合的整体来设计,对每个分系统的技术要求,都首先从实现整个系统技术协调的角度来考虑。总体设计部对研制中分系统之间的矛盾,分系统与系统之间的矛盾,都首先从总体目标的需要来考虑。

运用系统方法并综合运用有关学科的理论与方法,对型号工程系统结构、环境与功能进行总体分析、总体论证、总体设计、总体协调,包括使用计算机和数学为工具的系统建模、仿真、分析、优化、试验与评估,以求得满意的和最好的系统方案,并把这样的总体方案提供给决策部门作为决策的科学依据。一旦为决策者所采纳,再由有关部门付诸实施。航天型号总体设计部在实践中已被证明是非常有效的,在我国航天事业发展中,发挥了重要作用。

这个总体设计部所处理的对象还是个工程系统。但在实践中,研制这些工程系统所要投入的人、财、物、信息等也构成一个系统,即研制系统。对这个系统的要求,是以较低的成本、在较短的时间内研制出可靠的、高质量的型号系统。对这个研制系统,不仅有如何合理和优化配置资源问题,还涉及到体制机制、发展战略、规划计划、政策措施以及决策与管理等问题。这两个系统是紧密相关的,把两者结合起来又构成了一个新的系统。

显然,这个新系统要比工程系统复杂得多,属于社会系统范畴。如果说工程系统主要综合集成自然科学技术的话,那么这个新的系统除了自然科学技术外,还需要社会科学与人文科学等。如何组织管理好这个系统,也需要系统工程,但工程系统工程是处理不了这类系统的组织管理问题,而需要的是社会系统工程。

应用社会系统工程也需要有个实体部门,这个部门就是钱老提出的运用综合集成方法的总体设计部,这个总体设计部与航天型号的总体设计部比较起来已有很大的不同,有了实质性的发展,但从整体上研究与解决问题的系统科学思想还是一致的。

总体设计部是运用综合集成方法,应用系统工程技术的实体部门,是实现综合集成工程的关键所在。没有这样的实体部门,应用系统工程技术也只能是一句空话。

目前国内还没有这样的研究实体,有的部门有些像,但研究方法还是传统的方法。总体设计部也不同于目前存在的各种专家委员会,它不仅是个常设的研究实体,而且以综合集成方法为其基本研究方法,并用其研究成果为决策机构服务,发挥决策支持作用。从现代决策体制来看,在决策机构下面不仅有决策执行体系,还有决策支持体系。前者以权力为基础,力求决策和决策执行的高效率和低成本;后者则以科学为基础,力求决策科学化、民主化和程序化。这两个体系无论在结构、功能和作用上,还是体制、机制和运作上都是不同的,但又是相互联系相互协调的,两者优势互补,共同为决策机构服务。决策机构则把权力和科学结合起来,变成改造客观世界的力量和行动,如图 4 所示。

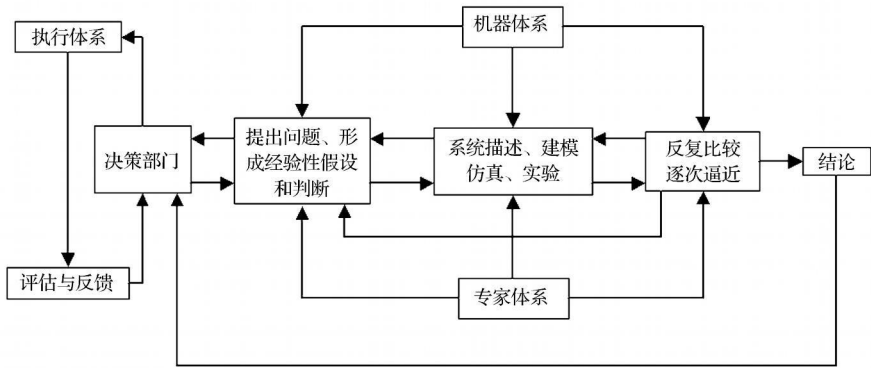


图 4 综合集成方法用于决策问题研究示意图

Fig. 4 Application of meta-synthesis to study of decision making

从我国实际情况来看,多数部门是把两者合二而一了。一个部门既要作决策执行又要作决策支持,结果两者都可能做不好,而且还助长了部门利益。如果

有了总体设计部和总体设计部体系,建立起一套决策支持体系,那将是我们决策与管理上的体制机制创新和组织管理创新,其意义和影响将是重大而深远的。

钱学森一直大力推动系统工程,特别是社会系统工程的应用,为了把社会系统工程应用到国家宏观层次上的组织管理,促进决策科学化、民主化和组织管理现代化,曾多次提出建立国家总体设计部的建议。1991年3月8日,钱老向当时的中央政治局常委集体,汇报了关于建立国家总体设计部的建议,受到中央领导的高度重视和充分肯定。十几年过去了,由于种种原因,钱老的这个建议至今也没有实现。但现实的情况却使我们看到,大量的事实越来越清楚地显示出这个建议的重要性和现实意义。

一个单位、一个部门甚至一个国家的管理,首要的问题是从整体上去研究和解决问题,这就是钱老一直大力倡导的“要从整体上考虑并解决问题”<sup>[6]</sup>。只有这样才能把所管理的系统整体优势发挥出来,收到 $1+1>2$ 的效果,这就是基于系统论的系统管理方式。

但在现实中,从微观、中观直到宏观的不同层次上,都存在着部门分割、条块分立、各自为政、自行其是,只追求局部最优而置整体于不顾。这里有体制机制问题,也有部门利益问题,还有还原论思维方式的深刻影响。这种基于还原论的管理方式,使得系统的整体优势无法发挥出来,其最好的效果也就是 $1+1=2$ ,弄不好还会 $1+1<2$ ,而后一种情况可能是多数。

系统管理实际上是钱老系统集成思想和方法在实践层次上的体现。因此,总体设计部、系统集成方法、系统工程特别是社会系统工程紧密结合起来,就成为系统管理的核心内容。

通过以上所述,钱学森开创复杂巨系统的科学与技术,实际上就是由系统集成方法、系统集成理论、系统集成技术与系统集成工程构成的复杂巨系统科学技术体系,这就把系统科学体系大大向前发展了,发展到了复杂巨系统科学技术体系。

从现代科学技术发展趋势来看,一方面是已有的学科与领域不断分化、越分越细,新学科、新领域不断产生,呈现出高度分化的趋势;另一方面是不同学科、不同领域之间相互交叉、结合与融合,向综合性整体化方向发展,呈现出高度综合的趋势。这两者是相辅相成相互促进的,系统科学就是这后一发展趋势中最有代表性和基础性的学问。

从科学技术发展过程来看,前一趋势出现的较早,发展到一定阶段后才开始涌现出后一发展趋势。支撑前一发展趋势的人才基础是专才或专家。对于后一发展趋势的人才基础则是复合型人才,这类人才不仅具有专才的素质,还要有跨学科、跨领域和跨层次的研究能力和创新能力。

从方法论角度来看,在前一发展趋势中起主导作用的是还原论方法。但对于这后一发展趋势,我们始终面临着如何把不同科学技术部门、不同学科以及不同层次的知识综合集成起来的问题。对于这类纵横交错的知识综合集成,钱学森提出的综合集成方法,可以发挥重要的方法论和方法的作用。

钱学森的综合集成思想和方法以及开创复杂巨系统科学技术体系,就是这个发展趋势中涌现出来的学问,它不仅将系统科学发展到了一个新的阶段,同时也必将对现代科学技术发展产生深刻的影响,特别是对现代科学技术向综合性整体化方向发展过程中发挥重要作用。这是钱学森对现代科学技术发展的伟大贡献,也是中华民族乃至全人类的宝贵知识财富和思想财富。

钱学森的系统科学成就与贡献,不仅充分反映出他的科学创新精神,同时也深刻体现出他的科学思想与科学方法。集大成,得智慧。综合集成,大成智慧。从科学视野来看,钱学森是一位名副其实的科学大师、科学帅才、科学泰斗和科学领袖,也是一位杰出的战略科学家。

钱学森的科学成就与贡献,来自他具有坚定的政治信仰与信念,高尚的思想情操和品德,钱老曾说,“我作为一名中国的科技工作者,活着的目的是为人民服务”,钱老的一生就是为此而奋斗的一生。从人民视野来看,钱学森是一位名副其实的人民科学家。一代宗师,百年难遇!钱学森是中华民族的光荣,也是中国人民的光荣!

钱老虽然离开了我们,但他的科学创新精神、科学思想、科学业绩却永远活在我们心中,我们怀念他、纪念他,最重要的是把他所开创的科学事业继承下去并发扬光大!

## 参考文献 (References)

- [1] 钱学森.论系统工程(新世纪版)[M].上海:上海交通大学出版社,2007
- [2] 钱学森.基础科学研究应该接受马克思主义哲学指导[J].哲学研究,1989(1):4-9
- [3] 钱学森.人体科学与现代科学技术发展纵横观[M].北京:人民出版社,1996
- [4] 钱学森.创建系统学[M].太原:山西科学技术出版社,2001
- [5] 李政道.新世纪:微观与宏观的统一[J].科学世界,2000(1):1
- [6] 钱学森.创建系统学(新世纪版)[M].上海:上海交通大学出版社,2007

(编辑:夏光)