

文章编号:1007-6735(2011)06-0548-14

创建系统学——开创复杂巨系统的科学与技术

于景元

(中国航天科技集团公司 710 研究所, 北京 100037)

钱学森是中国现代史上一位杰出的科学家,同时也是一位杰出的思想家。

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做出了杰出贡献。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,从科学、技术、工程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,都做出了许多开创性的独特贡献。而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。

钱老的科学历程大体上可分为 3 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,工程控制论已不完全属于自然科学领域,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,而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。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这个事实表明,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。这个时期工作更多的是工程实践,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技术并综合集成到工程实践中。由于钱学森在自然科学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。从今天角度来看,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阶段,其根本原因就在于自主创新。

收稿日期:2011-10-31

作者简介:于景元(1937—),男,研究员。研究方向:控制论、系统工程、系统科学及其应用。

E-mail:yujy@nasic.spacechina.com.

航天系统工程的成功实践,证明了系统工程的科学性和有效性,不仅适用于自然工程,同样也适用于社会工程.系统工程的应用与实践也是钱老对管理科学与工程的重要贡献.

第三阶段是20世纪80年代初到现在.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、涉猎学科之广泛、原创性之强,在学术界是十分罕见的.他通过讨论班、学术会议以及与众专家、学者书信往来的学术讨论中,提出了许多新的科学思想和方法、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.

在这个阶段上,钱老花费心血最多也最具有代表性的是他建立系统科学体系和创建系统学的工作.从现代科学技术发展趋势来看,一方面是已有学科不断分化,越分越细,新学科、新领域不断产生,呈现出高度分化的特点;另一方面是不同学科、不同领域之间相互交叉、结合与融合,向综合性整体化的方向发展,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,最有基础性的学问.钱老不仅善于从各学科、各领域吸收营养来构建系统科学,如创建系统学、发展系统工程技术等,而且又能从系统科学角度和综合集成思想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.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.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.

上个世纪70年代末,钱学森在大力推动系统工程应用的同时,就提出了创建系统学的问题.80年代中,在他亲自倡议和指导下,开始了“系统学讨论班”的学术活动.每次讨论会钱老不仅都要参加,而且都

能发表自己的看法和观点,与大家平等地讨论问题.这种学风就是他一直大力倡导的学术民主.用书信与有关人员讨论学术问题,也是钱老进行学术交流的重要方式,这里既有著名的专家、学者,也有一般的科技人员.

在这些学术活动和交流中,对于系统学和系统科学,钱学森提出了许多创新的学术思想和重要的学术观点,提炼了很多重要的科学概念,建立了新的系统论方法,开创了复杂巨系统的科学与技术这个新领域.所有这些对创建系统学和发展系统科学,都具有极为重要的科学价值和深远的学术影响.

2001年,我们收集和整理了这段时间钱老所发表的论文、讲话和书信,编辑出版了钱学森著《创建系统学》一书(山西科学技术出版社).2006年又编辑出版了《钱学森系统科学思想文库》(四卷本,上海交通大学出版社),其中,第三卷就是《创建系统学》(新世纪版).这些著作集中反映了钱学森系统科学思想的发展历程、原始创新思想以及科学创新精神.我们可以从中领悟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.这是我们宝贵的知识财富和思想财富,值得我们认真学习和研究,以便把他所开创的科学事业继续发展下去并发扬光大.

钱学森指出,系统学的建立是一次科学革命,它的重要性决不亚于相对论和量子力学.从现代科学技术发展趋势来看,如果说量子力学是微观层次(典型尺度为 10^{-17} m)上的科学革命,相对论是宇观层次(典型尺度为 10^{21} m)上的科学革命,那么系统学则是宏观层次(典型尺度为 10^2 m)上的科学革命.宏观层次就是我们所在的地球.在这个层次上出现了生命和生物,产生了人类和人类社会.这是一个丰富多彩并充满了复杂性的世界.建立这个层次上的系统理论,无疑是科学上的巨大进步.系统学特别是复杂巨系统学,就是着眼于这个层次上的.这是一个十分诱人而又极具挑战性的科学新领域.

1 人类认识和改造世界的知识体系

创建系统学具有深刻的科学背景和广泛的实践基础.我们首先从钱学森提出的现代科学技术体系与系统科学体系开始,并进行一些讨论.

人类发展的历史表明,社会实践是人类最基本、最主要的活动.人类是通过社会实践去认识客观世界和改造客观世界的.在这个过程中,人类获得和掌握了大量的知识.在这些知识中,有一部分是经过研究、

提炼和概括而成为理论,同时又被实践证明是对客观规律的正确认识,这部分知识就是我们通常所说的科学知识.科学知识的特点是,不仅能回答是什么,还能回答为什么.这是人类长期社会实践和不懈的研究探索所积累起来的宝贵知识财富和资源.

现代科学技术的发展已经取得了巨大成就.今天,人类正探索着从渺观(典型尺度 10^{-36} m)、微观(典型尺度 10^{-17} m)、宏观(典型尺度 10^2 m)、宇观(典型尺度 10^{21} m)直到胀观(典型尺度 10^{40} m)5个层次时空范围的客观世界.其中,宏观层次就是我们所在的地球,在地球上又出现了生命和生物,产生了人类和人类社会.这个客观世界包括自然的和人工的,而人也是客观世界的一部分.客观世界是一个相互联系、相互作用、相互影响的整体,因而反映客观世界不同层次、不同领域的科学理论也是相互联系、相互影响的整体.

现代科学技术的发展已产生和形成了众多的学科和科学领域,而且新学科、新领域还在不断地涌现,这是分化的一面;但另一方面,也就是综合方面,正如钱老所指出的“现代科学技术不单是研究一个个事物、一个个现象,而是研究这些事物、现象发展变化过程,研究这些事物相互之间的关系.今天,现代科学技术已发展成为一个很严密的综合起来的体系,这是现代科学技术的一个很重要的特点.”^[1]构建这个体系就涉及到科学技术部门划分的问题.传统上是按研究对象的不同来划分科学技术部门.但钱老认为,科学技术部门的划分不是研究对象的不同,研究对象都是整个客观世界,而是研究客观世界的着眼点、看问题的角度不同.他指出:“在以前,我们有一种习惯看法,好像自然科学跟社会科学不同,研究的对象不一样,自然科学是研究自然界的,社会科学是研究人类社会里面发生的问题.我现在提出一个新的观点,我为什么这么提?这里首先有一个想法,现代科学技术是一个整体,不是分割的,整体在哪里?整体在研究对象是一个客观世界.而我们把它分成六个部门(按:当时是指自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学)这不是把整体的客观世界分成六大片.不是这个意思,而是研究整个客观世界.从不同的角度,不同的观点去研究客观世界.这么一个思路,我也得启发于系统论.”^[2]从这个观点来看,自然科学是从物质在时空中的运动、物质运动的不同层次、不同层次的相互关系这个角度来研究客观世界的;社会科学是从人类社会运动以及它和客观世界相互影响这个角度来研究客观世界;数学科学是从质和量的

对立统一、相互转变的角度来研究客观世界的;系统科学是从部分与整体、局部与全局以及层次关系的角度来研究客观世界的……^[2].

传统科学技术部门的划分不仅限制了科学家们的科学视野和研究范围,而且也造成了学科分立和部门分割,人为地把一个相互联系的客观世界的整体认识,分割成一块一块互不联系的学问.这固然有历史的原因,但与人们的还原论思维方式也有很大关系.钱老的这种划分,体现了一种系统思维方式,是从整体上研究和解决问题.对沟通和加强各个科学技术部分之间的联系,进行跨学科、跨领域、跨层次的交叉性、综合性和整体性的研究与实践,具有十分重要的意义.

从系统科学思想出发,钱学森提出了现代科学技术体系结构.从纵向上看,有11个科学技术部门,从横向看有3个层次的知识结构^[3].这11个科学技术部门是自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、行为科学、人体科学、军事科学、地理科学、建筑科学、文艺理论.这是根据现代科学技术发展的目前水平所作的划分.随着科学技术的发展,今后还会产生出新的科学技术部门,所以,这个体系是个动态发展系统.

在上述每个科学技术部门里,都包含着认识世界和改造世界的知识.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.从这个角度来看,自然科学经过几百年的发展,已形成了3个层次的知识,这就是直接用来改造世界的应用技术(工程技术);为应用技术直接提供理论方法的技术科学;再往上一个层次就是揭示客观世界规律的基础理论,也就是基础科学.技术科学实际上是从基础理论到应用技术的过渡桥梁,如应用力学、电子学等.这3个层次的知识结构,对其它科学技术部门也是适用的,如社会科学的应用技术就是社会技术.唯一例外的是文艺,文艺只有理论层次,实践层次上的文艺创作,就不是科学问题,而属于艺术范畴了.

现代科学技术体系包含了不同科学技术部门,每个部门又包括了3个不同层次的知识.但整体上还都属于科学知识范畴.那么现代科学技术是不是包括了所有人类从实践中获得的知识呢?实际上,人类从实践中获得的知识远比现代科学技术体系所包含的科学知识丰富得多.人类从实践中直接获得了大量和丰富的感性知识和经验知识,以至不成文的感受.这部分知识的特点是知道是什么,但还回答不了为什么.所以,这部分知识还进入不了现代科学技术体系之

中,我们把这部分知识称作前科学。尽管如此,这部分知识对于我们来说仍然是很有用的,也是宝贵的,我们同样也要十分珍惜。

前科学中的感性知识、经验知识,经过研究、提炼可以上升为科学知识,从而进入到现代科学技术体系之中,这就发展和深化了科学技术本身。同时,人类不断的社会实践又会继续积累新的经验知识、感性知识,这又丰富了前科学。人类社会实践是永恒的,上述这个过程也就永远不会完结。由此可看,现代科学技术体系不仅是动态发展系统,也是一个开放的演化系统。

辩证唯物主义是人类对客观世界认识的最高概括,它反映了客观世界的普遍规律。它不仅是知识,还是智慧,是人类智慧的最高结晶。辩证唯物主义也是对科学技术的高度概括,它通过 11 座桥梁与 11 个科学技术部门相联系。相应于前述 11 个科学技术部门,这 11 座桥梁分别是:自然辩证法、历史唯物主义、数学哲学、系统论、认识论、人学、人天观、军事哲学、地理哲学、建筑哲学、美学。这些都属于哲学范畴,是部门哲学。

综合以上所述,从前科学到科学,即现代科学技术体系,再到哲学这样 3 个层次的知识,就构成了整个人类知识体系,这个体系既是人类有史以来经过社会实践积累起来的宝贵知识财富和精神财富,又是我们认识世界和改造世界的强大武器。

现代科学技术体系给予我们的重要启发,就是不仅要发挥每个科学技术部门的重要作用,更要发挥这个体系的综合优势和整体功能。特别是不同科学技术部门、不同层次知识的系统集成,更能提高我们认识客观世界的水平和改造客观世界的能力。

系统科学是现代科学技术体系中的一个科学技术部门,正如前面已经指出,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。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所构成的具有某些功能的整体,这是国内外学术界普遍公认的科学概念。这样定义的系统在客观世界是普遍存在的。所以,系统也就成为系统科学研究和应用的主要对象。系统科学与自然科学、社会科学等不同,它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整体研究。这就是为什么系统科学具有交叉性、综合性、整体性和横断性的原因,也正是这些特点使系统科学处在现代科学技术发展的综合

性整体化方向上。

在钱老建立的系统科学体系中,处在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;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;而处在基础理论层次上的便是系统学(systematology)。从这里可以看出,系统学是研究客观世界系统普遍规律的基础科学。这样 3 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可丰富和发展辩证唯物主义,这是一种双向互动关系。

对于系统论,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。”^[4]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基础和方法论基础。这些内容在后面还将进行详细介绍。

我们再从实践的角度来看一下系统科学、系统论的重要价值和意义。

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得最好。从实践过程来看,包括实践前形成的思路、设想以及战略、规划、计划、方案、可行性等,都要进行科学论证,以使实践的目的性建立在科学的基础上;也包括实践过程中,要有科学的组织管理与协调,以保证实践的有效性,要有效益和效率,并取得最好的效果;还包括实践过程中和实践过程后的评估,以检验实践的科学性和合理性。从微观、中观直到宏观的所有社会实践,都具有这些特点。

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。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,以至前科学层次上的经验知识和感性知识的指导和帮助。即使这样,社会实践还会涌现出已有理论与技术无法处理的新问题,像我国改革开放和社会

主义现代化建设这样伟大的社会实践,就有大量的新问题需要创新来解决。现在,为实现创新型国家目标,更要通过国家创新体系建设来实现。

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,钱老提出的综合集成方法可以处理这类问题。

社会实践通常包括3个重要组成部分,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(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的极端重要性。这也就是社会实践或工程的系统科学观。

2 系统学和复杂巨系统学

在创建系统学过程中,钱老提出的一些重要学术思想和科学概念,奠定了系统学的科学基础。

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。参加讨论班的老、中、青三代科技工作者,分别来自中国科学院、中国社会科学院、北京大学、中国人民大学、北京师范大学、国防科学技术工业委员会、航空航天工业部和国务院发展研究中心等单位。

在第一次讨论班上,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。”^[5]在这次报告中,除了这些内容外,又增加了微分动力体系理论、混沌和奇异吸引子理论、非整几何以及非线性动力系统理论等。从这个发展过程可以看出,钱学森为创建系统学,除了从系统工程实践以及运筹学、控制论、信息论等这些系统科学体系内的技术科学中去提炼、概括以外,还从其它科学技术部门的发展中去提炼,如自然科学中的物理学、化学、生物学等以及数学科学的进展,都为建立系统学提供了丰富的素材。这些学科虽然不是直接以系统作为研究对象,但却揭示了许多深刻的系统规律,如普利高津与哈肯的自组织理论等。钱学森的这一思想后来又扩展到更广泛的学科,如军事科学、社会科学、地理科学等。

正是在钱老这些思想指导下,就与系统学有关的科学理论,如动力系统理论、混沌理论、现代控制理论、耗散结构理论、数理经济学、协同学、超循环理论、突变论、模糊数学、人工智能、医学、脑科学、思维科学、数量经济学、定量社会学、生态学、地理科学、作战模拟、军事科学、优化理论等的最新进展,都在系统学讨论班上组织了学术报告和讨论。每次都由一位主讲人作专题学术报告,然后提问和讨论,最后由钱老作总结性发言。作主报告的人,既有著名科学家,如吴文俊、廖山涛、叶笃正、许国志、马世骏等,也有各有关领域的一些专家学者。

从1986~1992年的7年时间里,每次讨论班钱老都参加。1992年之后,他因行动不便,就不再参加讨论班的学术活动了。但他不仅继续关注讨论班的学术活动,同时又组织了由王寿云同志负责,有于景元、戴汝为、汪成为、钱学敏、涂元季同志参加的小讨论班。这个小讨论班不仅经常要讨论一些问题,有时还在钱老指导下研究一些问题,如信息革命与产业革命问题等。

在上述讨论中,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。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,而美国圣菲研究所(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.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,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.”^[6]看来他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,钱学森和国外科学家们不同,它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、自旋玻璃等,他们都叫复杂性问题.但钱老认为,这种复杂性并不复杂,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.”^[7]他还进一步指出,圣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,给出复杂性一个清晰和具体的描述.

上述的系统分类还意味着有不同的研究方法.从方法论角度来看,对简单系统、简单巨系统,都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.对于简单系统可用直接方法从子系统间的相互作用综合成全系统的整体功能,如运筹学、控制理论中的方法;对简单巨系统可用统计方法处理,如普利高津和哈肯的自组织理论.但对于开放的复杂巨系统,包括社会系统,却是个新问题.它不是还原论方法或其它已有方法所能处理的,需要有新的方法论和方法.从这个意义上说,这确实是一个科学新领域.

对于所有系统来说,它的一个重要特点就是系统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,也包含在系统学的研究之中.

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,那么现在则发展到开放的复杂巨系统(包括社会系统).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)为主线的系统学提纲和内容,构成了系统学的基本框架,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.

哈肯和普利高津两位科学家都访问过我国,对以钱学森为代表的中国科学家在发展系统科学和创建系统学方面的工作有所了解.哈肯曾说:“系统科学的概念是由中国学者较早提出的,我认为这是很有意义的概括,并在理解和解释现代科学,推动其发展方面是十分重要的.”并认为“系统科学和系统工程在当代中国科学中的地位至关重要,我在访问中国期间已觉

察到这一点.在访问中,中国人思考和解决问题的方式一再给我留下深刻印象.我确信,这种思考方式将在全世界传播开来.”^[8]

3 综合集成方法

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一新领域,这是钱学森综合集成思想与方法的具体体现.

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”^[6].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.”^[9]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,就把这个部分和其它部分的关联关

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,用他的话说,对生物在分子层次上了解得越多,对生物整体反而认识得越模糊.在这种情况下,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“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.”^[10]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.所谓复杂性其实都是系统复杂性,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.所以,对复杂性研究,他们后来也采用了“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.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70年代末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、社会科学等其它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.

20世纪80年代初,他在国防科工委指导了几项

复杂武器系统的定量研究,在这些研究中,他提出了处理复杂行为系统的定量方法学是科学理论、经验知识和专家判断力的结合,这种定量方法学是半经验半理论的。后来在“系统学讨论班”上,又继续方法论的探索。这时他特别注意到社会系统、地理系统、人体系统中一些成功的研究。如在社会系统中,由几百个至几千个变量描述的,定性定量相结合的系统工程方法对社会经济系统的研究;在地理系统中,用生态学、环境保护以及区域规划等综合探讨地理系统的研究;在人体系统中,把生物学、生理学、心理学、西医学、中医和传统医学等综合起来的研究等。

钱学森不仅高度重视这些实际案例的研究,而且还具有从这些成功研究中提炼新概念、概括新理论的超人智慧。20世纪80年代中,他对一项关于社会经济系统的研究十分重视。这项研究成为他后来提出“从定性到定量综合集成方法”的一个实践依据。下面对此作些说明。

这项工作始于20世纪80年代初,当时的航天部710所在经济学家马宾的具体指导下,完成了财政补贴、价格、工资综合研究以及国民经济发展预测工作。这是当时经济体制改革中提出的问题。我国的改革开放首先是从农村开始的,然后转向城市。1979年以来,为了提高农民生产积极性,在农村实行了农副产品收购提价和超购加价政策,其结果不仅促进了农业发展,也提高了农民的收入水平。但当时的零售商品(如粮、油等)的销售价格并未作相应调整,而是由国家财政补贴的。随着农业生产连年丰收,超购加价部分迅速扩大,财政补贴也就越来越多,以至成为当时中央财政赤字的主要根源。同时也使财政收入增长速度明显低于国民收入增长速度,财政收入占国民收入的比例逐年下降。这就严重地影响了国家重点工程的投资,也制约了国民经济发展的速度。

财政补贴产生的这些问题,引起了中央领导的极大重视。有关部门也曾提出通过价格调整来逐步减少以至取消财政补贴的建议。但提高零售商品价格,又必须同时提高职工工资,否则将会影响到人民生活水平。而这又涉及到财政负担能力、市场平衡、货币发行以及银行储蓄等。总之,这个问题涉及到了整个国民经济中的生产、消费、流通、分配等各个领域。问题的困难还在于,究竟零售商品价格调整到什么水平,工资提高到什么水平,才能取消财政补贴而又使人民实际收入水平至少不降低。对此,仅有一般的思路显然是不够的,必须定量研究才有可能回答这些问题,从而为决策提供科学依据。

马宾非常赞赏钱学森大力推动的系统工程,并希望用系统工程方法解决这个问题。但仅靠系统工程专业人员也是不行的,需要使经济学家、各有关部门的管理专家、系统工程专业人员等走到一起,相互结合、“磨合”以至融合;从没有共同语言到相互“心领神会”;从实际的经济体制、运行体制、管理体制与机制等各个方面,进行研究和讨论,以明确问题的症结所在,找出解决问题的途径,从而形成对这个问题的定性判断。这种定性判断综合集成了个方面专家的理论、经验知识和智慧。但它毕竟还是经验性设想,因为这种判断是否正确,是否可行,还没有用严谨的科学方式加以证明。即便如此,这一步是非常关键的,它是准确把握问题的实质和定量研究的基础。

为了用系统工程方法处理这个问题,首先要用系统科学的术语来界定有关概念。在此项研究中,财政补贴、价格、工资以及直接或间接有关的各个经济组成部分,是一个相互关联、相互影响并具有某些功能的系统。调整价格和工资实际上就是改变和调整这个系统组成部分之间的关联关系,从而改变系统功能,特别要使它具有我们所希望的功能。这就把问题纳入到了系统框架,进而界定系统边界,明确哪些是系统环境变量、状态变量、调控变量(政策变量)和输出变量(观测变量),为模型设计,确定模型功能提供定性基础。

系统建模既需要理论方法又需要经验知识,还需要真实的统计数据和有关信息资料,对结构化较强的系统如工程系统,有自然科学提供的各种定量规律,系统建模较为容易处理。但面对这类复杂系统,并没有定量规律可循,只能从对系统的真实理解甚至经验知识出发,再借助实际统计数据去提炼信息。这个系统建模所需数据量近万个,而且还要克服数据口径不统一、时间序列不完整的困难。所有这些是这类复杂系统定量研究的难点所在。模型是对经济实体的近似描述,不可能也没有必要把实体的所有因素都反映到模型中去,只要抓住主要矛盾去建立模型并满足所研究问题的精度要求,那么模型就是可以信赖的。这个系统建模是以市场平衡为中心设计的。在结构上分为两大部分:一部分是国民收入分配和零售市场;另一部分是各产业部门的投入产出关系。前者由115个变量和方程描述,其中包括14项环境变量和6项调控变量,用来体现外部环境和调控政策。后者是237个部门的产业关联矩阵。这个模型可以进行政策模拟,也可以作经济预测,其平均模拟误差和预测误差都在3%以内,满足经济研究中的精度要求。

运用建立起来的系统模型,按照不同的国力条件(环境变量),调控变量(价格与工资)不同的调整起始时间,不同的调整幅度,不同的调整方法(一次性调整或多次调整),在当时的大型数字计算机 B6810 上进行了 105 种政策模拟。并以市场平衡、财政平衡、货币流通和储蓄、职工和农民收入水平为度量标准,寻求最优、次优、满意和可行的政策,从而定量地回答价格与工资能否进行调整以及调整结果如何,何时调整为宜,如何调整最为有利等问题。

这样的定量结果,再由经济学家、管理专家、系统工程专家等共同分析、讨论,充分发扬学术民主,畅所欲言。比起开始时的定性判断,这一次毕竟增加了新的定量信息。在专家们进行新一轮信息与知识的综合集成时,其结论可能是:这些测算结果是可信的,也可能是不可信的,或者还有什么地方是要改进的。如果需要改进,再修正模型和调整参数,重复上述工作。第二次测算的结果,再请专家讨论。这个过程可能要重复多次,直到各方面专家都认为结果是可信和满意的,再作出结论和提出政策建议。这时的结论已不再是开始所作的定性判断,而是有足够定量依据的科学结论。在这项研究的最后成果中,通过上述步骤,选择了 5 种政策建议,供中央领导决策参考。

需要说明的是,这套方法完全是基于实践需要,从实际出发逼出来的,没有人想到其中还蕴涵着什么深刻道理。但钱老却看出,这个方法能把多学科理论和经验知识结合起来,把定性研究和定量研究有机结合起来,通过定性综合集成,定性和定量相结合综合集成以及从定性到定量综合集成,从多方面定性认识上升到定量认识,解决了当时还没有办法处理的复杂巨系统问题。它体现了人-机结合以人为主的特点。同时钱老也指出了此方法的某些不足,比如在集成专家意见时还是手工作业式的,计算机的其它功能尚未发挥出来。

特别值得说明的是,钱老当时就指出以计算机、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,也就是定性与定量相结合,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,甚至比人脑做得还好、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,它的智慧比人要高,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。用图 1 来说明这一点。

从图 1 中可以看出,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。

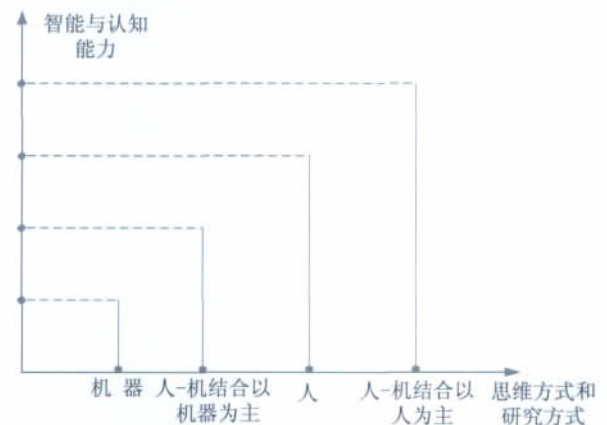


图 1 人-机结合思维方式

Fig. 1 The thinking method of men-machine combination

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”(以下将两者合称为综合集成方法),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-网结合以人为主要的信息、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-机结合以人为主要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.按照我国传统文化有“集大成”的说法,即把一个非常复杂的事物的各个方面综合集成起来,达到对整体的认识,集大成得智慧,所以,钱老又把这套方法称为“大成智慧工程”.将大成智慧工程进一步发展,在理论上提炼成一门学问,就是大成智慧学.

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(包括社会系统)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.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(包括社会系统)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(包括社会系统)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-机结合以人为主要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-机结合以人为主要,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作出明确结论.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3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.

应该指出的是,这个过程就是综合集成研讨厅的研讨流程,也是研讨厅中机器体系设计的设计思想和技术路线.复杂系统与复杂巨系统以及社会系统问题,通常是非结构化问题.通过上述综合集成过程可以看出,在逐次逼近过程中,综合集成方法实际上是用结构化序列去逼近非结构化问题.

需要补充说明的是,这个方法的最初表述是“定性定量相结合的综合集成方法”,后来钱老建议改成“从定性到定量综合集成方法”.从综合集成全过程来看,前者的表述只是突出了中间的过程,尽管这一步非常重要,但还不是完整表述.这个改动一方面体现了人认识客观世界的规律是从感性认识到理性认识,同时也体现了思维科学中从以形象思维为主的经验判断到以逻辑思维为主的精密论证过程,这也正是一切“精密科学”的共同特点.

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.

在现代科学技术向综合性整体化方向发展过程中,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.对于这种纵横交错的知识综合集成,综合集成方法可以发挥重要的方法论和方法作用.从方法论和方法

特点来看,综合集成方法本质上就是用来处理跨学科、跨领域和跨层次问题研究的方法论和方法.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,钱学森提出的系统学,特别是复杂巨系统学,就是要建立这套理论.国外关于复杂性的研究,实际上也是属于这个范畴.复杂性研究和复杂科学的积极倡导者 Gell-mann,在他所著的《夸克与美洲豹》一书中,曾写道:“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到一起,有些事实和想法初看起来彼此风牛马不相及,但新的方法却很容易使它们发生关联”.Gell-mann 并没有说明这里所说的新途径、新方法是什么,不过从他们后来关于复杂系统、复杂适应系统的研究来看,这个新途径和新方法就是系统途径和系统方法.但在这方面,他们还远没有达到钱学森的高度、广度和深度.

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.当年钱老建立工程控制论就是走的这个路子.在开放的复杂巨系统研究中,实践经验和资料积累最丰富的是社会系统和人体系统.对这两类系统研究,他已在进行理论概括.例如,他曾提出开放的复杂巨系统的整体行为描述,要用系统状态(system state)这个概念,如有奇异吸引子,即为系统态(system eigenstate).微观混沌(就其无序意义来说)是宏观有序的基础.社会系统中的“良性循环”、“协调发展”就是一种系统态.

90年代末,钱老对建立系统学又提出了一个新的思路.他指出,系统学的创建不是走由下而上的路线,即由简单系统、大系统和简单巨系统的研究再上升到复杂巨系统的研究;而是走自上而下的路线,即首先研究开放的复杂巨系统,找到处理这种复杂巨系统的方法论.然后以此为主干,在各种不同条件下分支出简单系统、大系统和简单巨系统及其处理方法.也就是从开放的复杂巨系统学来建立系统学,即从繁到简.这个路线体现了钱学森的从总体上研究和解决问题一贯思想,也指明了创建系统学的重点要集中在开放的复杂巨系统这个新领域上,复杂巨系统的科学与技术是系统科学发展的一个新的

阶段^[11].

4 系统科学的发展

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出现和发展,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,系统工程不同于其它技术,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相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.

当我们把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.

钱老对社会系统工程,特别是国家层次的社会系统工程有过清楚的论述.他根据社会形态的概念,从整体上研究社会主义建设的组织管理问题,提出了社会主义建设的体系结构,这是社会系统研究的一个重要进展.社会形态这个概念是马克思首先提出来的.尽管社会系统很复杂,但如果把社会形态和社会系统结构结合起来,“从宏观角度看,这样复杂

的社会系统,其形态,即社会形态,最基本的侧面有三个,这就是经济的社会形态、政治的社会形态和意识的社会形态。”^[12]社会形态这三个侧面是相互联系、相互影响、相互作用的,从而构成一个社会的有机整体,形成了社会系统结构。

从社会发展和文明建设的角度来看,相应于社会形态的三个侧面,也有三种文明建设:这就是相应于经济的社会形态的经济建设,即物质文明建设;相应于政治的社会形态的政治建设,即政治文明建设;相应于意识的社会形态的思想文化建设,即精神文明建设。结合我国实际情况,钱老提出了我国社会主义建设的系统结构:a. 社会主义物质文明建设,包括科技经济建设、人民体质建设;b. 社会主义政治文明建设,包括民主建设、法制建设和政体建设;c. 社会主义精神文明建设,包括思想建设和文化建设;d. 地理建设,包括基础设施建设、环境保护和生态建设。以上共四大领域九个方面。在这九个方面中,科技经济建设是基础,是中心,这也符合邓小平同志提出的以经济建设为中心和科学技术是第一生产力的思想。

由于社会形态三个侧面的相互关联,也就决定了社会主义三个文明建设之间是相互联系、相互影响、相互作用的。这是从社会系统内部来说的。社会系统的外部环境即地理系统和社会系统之间也是相互联系、相互影响、相互作用的。从系统科学观点来看,只有当社会系统内部之间以及其外部环境相互协调时,才能获得最好的整体功能,这就是社会主义三个文明建设以及与地理建设之间,必须协调发展,形成良性循环,才能使我国社会主义建设的速度更快、效率更高、效益更好。反之,如不协调,那么社会主义建设事业就会受到影响,甚至造成巨大损失。

四大领域的建设是变革和建设社会与其地理环境并使它们之间协调发展的伟大实践,这是一项极为复杂的大规模工程。既然是工程,是改造客观世界,那就不仅需要理论,还需要技术。钱老指出:“我们可以把完成上述组织管理社会主义建设的工程叫作社会工程,它是系统工程范围的技术,但范围和复杂程度是一般系统工程所没有的,这不只是大系统而是巨系统,是包括整个社会的系统。”^[13]这里所说的社会工程就是社会系统工程。社会系统工程是组织管理社会系统,使四大领域协调发展,以获得长期和最好整体效益的工程技术。

在前面已指出,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技术去解决问题的局面。

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依靠自然科学技术的话,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.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,有的部门有点像,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、民主化和制度化.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.

从我国实际情况来看,多数部门是把两者合二而一了.一个部门既要决策执行又要决策支持,结果两者都没有做好,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,至今钱老的这个建议并没有实现.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.

一个企业、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”^[14].只有这样才能把所管理系统的整体优势发挥出来,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.

系统管理方式实际上是钱老综合集成思想在实践层次上的体现.因此,总体设计部、综合集成方法、系统工程特别是社会系统工程技术紧密结合起来,就成为系统管理方式的核心内容.

1991年10月,在国务院、中央军委授予钱学森“国家杰出贡献科学家”荣誉称号仪式上的讲话中,钱老说:“我认为今天的科学技术不仅仅是自然科学工程技术,而是人认识客观世界、改造客观世界整个的知识体系,这个体系的最高概括是马克思主义哲学.我们完全可以建立起一个科学体系,而且运用这个科学体系去解决我们中国社会主义建设中的问题.”^[15]从今天看来,钱老的这段话仍有重要的现实意义.

我国正在进行国家创新体系建设,增强自主创新能力,以实现创新型国家的宏伟目标.国家创新体系的核心内容就是知识创新体系^[16].本文介绍了钱老所建立的现代科学技术体系和人类知识体系.这个体系的形成、发展和应用,都是人类创造性劳动的结果,也是不断的知识创新过程.从这个体系结构中可以看出,不同科学技术部门、不同层次的知识,既有相互联系、相互影响、相互作用的一面,又有不同属性、不同特点与功能的一面.相应于现代科学技术

体系,也有不同类型的创新,一个是认识世界的科学创新,重大科学创新会导致人类认识客观世界的飞跃发展,这就是科学革命,如量子力学与相对论的产生.另一个是改造世界的技术创新,重大技术创新会导致人类改造客观世界能力的飞跃发展,这就是技术革命,如蒸汽机与计算机等的出现.再一个就是改造世界实践的应用创新.这三者相互关联、相互作用、相互影响,构成了一个知识创新体系.可用图2来说明.

从图2可以看出,知识创新过程是个正反馈过程,这个过程也就大大地推动了人类社会的发展和进步.

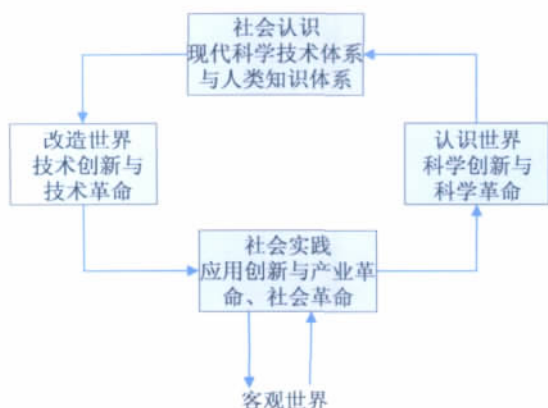


图2 现代科学技术体系和知识创新体系

Fig. 2 Modern science and technology system and knowledge innovation system

从知识创新角度来看,综合集成方法和总体设计部是知识创新主体,但和一般知识创新主体不同,它是进行跨学科、跨领域和跨层次研究并实现综合集成创新的知识创新主体.现代科学技术体系和人类知识体系为我们提供了宝贵的知识资源和智慧源泉,通过对这个体系的综合集成,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.这样,在科学、技术与工程的三个层次上形成了综合集成体系.钱老开创的复杂巨系统的科学与技术,实际上就是这样一个综合集成的科学技术体系.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会不一样,但方法论却是同一的.

由综合集成方法、综合集成理论、综合集成技术、综合集成工程所构成的综合集成体系不仅丰富和发展了现代科学技术体系,同时也推动了现代社会实践,这就是综合集成体系的重大科学价值和实践意

义,在国家创新体系建设中,我们应该予以高度重视.

综合集成体系是钱学森综合集成思想在方法论和方法、科学与技术以及社会实践不同层次上的体现,而在哲学上的体现就是大成智慧学.钱学森综合集成体系必将对现代科学技术发展产生深刻影响,特别对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重大贡献,也是中华民族和全人类的宝贵知识财富和思想财富.

参考文献:

- [1] 钱学森. 现代科学技术的特点和体系结构(新世纪版)[M]//论系统工程. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [2] 钱学森. 系统思想、系统科学和系统论[M]//论系统工程. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [3] 钱学森. 我们要用现代科学技术体系建设有中国特色的社会主义(新世纪版)[M]//创建系统学. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [4] 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.
- [5] 许国志, 王寿云, 柴本良. 论系统工程一书前言(新世纪版)[M]//论系统工程. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [6] GALLAGHER R, APPENLLER T. 超越还原论[C]//戴汝为. 复杂性研究文集, 1999.
- [7] 钱学森. 1990年7月16日致于景元的信[M]//涂元秀. 钱学森书信. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [8] 许国志, 顾基发, 车宏安. 系统科学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [9] 李政道. 新世纪: 微观与宏观的统一[J]. 科学世界, 2000(1): 1-5.
- [10] 钱学森. 系统工程与系统科学的体系(新世纪版)[M]//论系统工程. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [11] 钱学森. 开创复杂巨系统的科学与技术(新世纪版)[M]//创建系统学. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [12] 钱学森, 孙凯飞, 于景元. 社会主义文明的协调发展需要政治文明建设[J]. 政治学研究, 1989(5): 3-12.
- [13] 钱学森, 乌家培. 组织管理社会主义建设的技术——社会工程[J]. 经济管理, 1979(1): 1-7.
- [14] 钱学森. 要从整体上考虑并解决问题[M]//创建系统学. 新世纪版. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [15] 钱学森. 感谢、怀念和心愿[N]. 人民日报, 1991-10-17.
- [16] 于景元. 国家创新体系是开放的复杂巨系统[M]//国家创新体系发展报告. 北京: 知识产权出版社, 2008.

作者简介

- 郭 雷：中科院院士，中科院数学与系统科学研究院院长，上海系统科学研究院院长，国务院学位委员会委员。
- 许晓鸣：上海系统科学研究院院长，中国系统工程学会副理事长，上海理工大学校长、教授。
- 戴汝为：中科院院士，中国自动化学会理事长，上海系统科学研究院学术委员会主席，中科院自动化所学术委员会主任。
- 于景元：国务院学位委员会原委员，中国系统工程学会原副理事长，中国航天科技集团公司 710 研究所学术委员会主任、研究员。
- 汪应洛：中国工程院院士，上海系统科学研究院学术委员会主席，西安交通大学管理学院名誉院长、教授。
- 方福康：国务院学位委员会原委员、系统科学评议组原召集人，北京师范大学原校长、教授。
- 狄增如：国务院学位委员会系统科学评议组召集人，北京师范大学系统科学系教授。
- 谈庆明：中科院力学研究所教授。
- 高 岩：国务院学位委员会系统科学评议组成员，上海理工大学管理学院常务副院长、教授。
- 车宏安：上海系统科学研究院执行院长，上海理工大学复杂系统科学研究中心副主任、教授。
- 高小山：中科院系统科学研究所所长、研究员，中国系统工程学会副理事长。
- 张纪峰：中科院系统科学研究所副所长、研究员，中国系统工程学会副理事长，国务院学位委员会系统科学评议组召集人。
- 顾基发：国际系统研究联合会主席，中国系统工程学会原理事长，国际系统与控制研究院院士，中科院数学与系统科学研究院研究员。
- 陈光亚：中国系统工程学会原理事长，国际系统与控制研究院院士，中科院数学与系统科学研究院研究员。
- 汪寿阳：中国系统工程学会理事长，国际系统与控制研究院院士，中科院数学与系统科学研究院副院长、研究员。
- 王众托：中国工程院院士，中国系统工程学会原副理事长，大连理工大学知识科学与技术研究中心主任。
- 王浣尘：中国系统工程学会原副理事长，上海交通大学系统工程研究所教授。
- 费 奇：华中科技大学系统工程研究所原所长，国务院学位委员会控制科学与工程学科评议组原成员。
- 王红卫：华中科技大学控制科学与工程系主任、系统工程研究所所长，国务院学位委员会控制科学与工程学科评议组成员。
- 谭跃进：国防科技大学系统与管理学院院长、少将、研究员，中国系统工程学会副理事长。
- 王先甲：中国系统工程学会副理事长、学术委员会主任，武汉大学系统工程研究所所长、教授。
- 胡晓峰：国防大学信息作战与指挥训练教研部副主任、少将、教授。
- 陈 剑：中国系统工程学会副理事长，清华大学管理学院教授。
- 高自友：中国系统工程学会副理事长，北京交通大学系统科学研究所所长、教授，国务院学位委员会系统科学学科评议组成员。
- 徐玖平：中国系统工程学会副理事长、系统理论委员会主任，国际系统与控制研究院院士，四川大学管理学院副院长、教授。