

## “钱学森系统科学思想文库”序

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。钱学森对我国火箭、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。实际上钱学森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。而钱学森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。

钱学森的科学历程大体上可分为三个阶段。第一阶段是从 20 世纪 30 年代中到 50 年代中。这二十年是在美国度过的，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学森的第一个创造高峰。

值得指出的是，从现代科学技术发展来看，工程控制

## 创建系统学

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,研究这些关系的系统性质。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,钱学森已开始进行跨学科、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。这一时期钱学森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,需要广泛地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,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,这是钱学森的第二个创造高峰。

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的过程中,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。从今天的角度来看,这就是在当时的条件下,把科学技术创新、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。

航天系统工程的成功实践,证明了系统工程的理论与方法的科学性和有效

性,它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学森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,钱学森从科研一线领导岗位上退下来以后,就把自己的全部精力投入到学术研究之中。这一时期,钱学森学术思想之活跃、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、学术会议以及与众多专家、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学森的第三次创造高峰。

在这个阶段中,钱学森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。钱学森不仅善于从各学科、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”等等。这些新的学科和领域不仅与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,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。

钱学森的科学成就与贡献不仅充分反映出他的科学创新精神,同时也深刻地体现了他的科学思想和科学方法。这是我们宝贵的知识财富和精神财富,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。正是由于这个原因,中国系统工程学会和上海交通大学编辑出版《钱学森系统科学思

## 创建系统学

想文库》(以下简称“文库”)。出版这套“文库”的目的,一方面是为广大读者学习和研究钱学森科学思想、科学方法和科学精神提供系统的文献资料;另一方面,我们也将以此献给今年九十五岁高龄的人民科学家钱学森,并祝他健康长寿。

“文库”收集了钱学森在不同时期有关系统科学的主要著作和文章。包括《工程控制论》(科学出版社,1958年)、《论系统工程》(增订本,湖南科学技术出版社,1988年)、《创建系统学》(山西科学技术出版社,2001年)。这三本书构成了“文库”的一、二、三卷。按照系统科学体系结构,工程控制论是处在技术科学层次上,系统工程属于应用技术,而系统学则属于基础理论层次。从这个角度来看,这三卷著作集中反映了钱学森在系统科学及其不同层次上的科学成就与贡献。我们可以从中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。这三部著作,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。他们之中的一些同志,应邀为“文库”出版撰写了自己的研究心得与成果。将这些文章编辑成册就构成了“文库”的第四卷,即《钱学森系统科学思想研究》。

编辑出版这套“文库”,是由中国系统工程学会和上海交通大学联合组织进行的。中国系统工程学会理事长陈光亚研究员、副理事长于景元研究员、涂元季高级工程师和上海交通大学党委副书记潘敏同志、王浣尘教授并邀请中国科学院自动化研究所戴汝为院士、中国科学院系统科学研究所顾基发研究员、北京大学哲学系冯国瑞教授、上海理工大学和上海系统科学研究院车宏安教授共同组成了“文库”编委会。“文库”第一卷由戴汝为负责,第二卷由顾基发负责,第三卷由冯国瑞负责,第四卷由车宏安负责。“文库”的整个组织协调工作由于景元、涂元季负责。在“文库”编辑出版过程中,北京大学朱照宣教授、中国人民大学苗东升教授、二炮装备研究院赵少奎研究员,积极提供了有关资料并参与讨论,为这套“文库”的出版作出了贡献,在此向他们表示衷心的感谢。

编辑出版这套“文库”是一项艰难的工作,我们为此也作了很大努力,力求把这一工作做好。但由于我们水平有限,难免会有这样或那样的缺点和不足,甚至是错误之处。希望读者在阅读和学习“文库”之后,如有发现,请给予批评和指正,我们将十分感谢。

“钱学森系统科学思想文库”编委会

2006年11月

# 序

中国工程院院士 许国志

在钱老丰富多彩的科学生涯中,系统工程和系统科学是他最重视的研究领域之一。从20世纪70年代末开始,他花费很大心血,把主要精力集中在系统工程的推广和应用和系统科学理论的探索与研究上。1978年发表在《文汇报》上的“组织管理的技术——系统工程”一文和1990年发表在《自然杂志》上的论文“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”,代表了钱老系统工程和系统科学思想发展的两个阶段,都是具有里程碑性质的工作,对系统工程和系统科学的发展具有重要意义和深远影响。

1978年《文汇报》上的那篇文章是由钱老、我和王寿云联合署名的。文章发表时,全国科学大会刚召开不久,那是媒体首次发表中国学者阐述有关系统工程思想的文章。但事实上,钱老对系统工程的思考和认识远不是始于1978年。1963年我国制定第二个科学规划时,他就提出要搞系统工程。而再早还可追溯到20世纪50年代后期,他主持国防部五院工作时就建立了总体设计部,这个部门的工作实际上就是航天系统工程。钱老在美国很长一段时间是在加州理工学院喷气推进中心(JPC)工作。曾担任过加州理工学院喷气推进实验室(JPL)主任的匹克林(William Pickering)教授,在20世纪60年代写过一篇JPL系统工程发展史的文章,里面提到该实验室系统工程研究工作的发展,发源于钱老在加州理工学院JPC工作时期。从以上这些可以看出,钱老提出的一些根本性科技发展问题,都是经过较长时间深思熟虑的。

到了1978年,记得是4月30日,我给钱老写了封信,请示系统工程这件事现在是不是可以提上议事日程。钱老就此与我书信来往,并多次见面讨论,不久就写成了那篇发表在《文汇报》上的文章。这篇文章对中国系统工程的发展起到了推动作用。现在许多人,包括一些领导同志,脱口而出的一个名词就是系统工程,媒体上更是经常出现。有些人担心提得太多,可能会把系统的概念搞乱了,这当然值得注意。但我觉得,至少可以说,那些专家和领导同志都认为,他们现在抓的工作,或者说要解决的问题,如果要用一个词来表达的话,那么系统工程就是一个恰当的概括。

然而,钱老并不因为在系统工程方面做了不少开创性工作就止步不前,而是一直孜孜不倦地向前走。1978年的文章发表不久,在北京系统工程学术讨论会的

## 创建系统学

讲演中,他提出了建立系统学的问题。后来,他就有个想法,要通过举办系统学讨论班这样的方式,来开展系统科学的研究工作和培养系统科学的研究队伍。讨论班的形式也是钱老当年在美国从事科研工作常用的方法。从1986年1月起,在钱老的倡议和指导下,开始了“系统学讨论班”的学术活动,他亲自做了关于建立系统学的第一次学术报告。这个讨论班坚持了多年,雷打不动。每次他都参加,一方面认真听取别人的报告或发言,和与会人员平等地讨论,同时他也系统地阐述自己的体会和观点。在这个讨论班的基础上,钱老又把系统学的研究推进了一大步。系统学是研究系统结构与功能(系统的演化、协同与控制)一般规律的科学,这是系统科学的基础理论。事物常有两个方面,一个是事物的结构,另一个是其属性。而事物的主要属性之一是复杂性。钱老正是抓住这一特点,提出了开放的复杂巨系统概念。与此相应,他还提出了处理复杂巨系统的方法论,即“从定性到定量综合集成法”以及它的实践形式——“从定性到定量综合集成研讨厅体系”。这是从整体上研究和解决问题的方法。按照我国传统说法,把一个复杂事物的各个方面综合起来,达到对整体的认识,称之为集大成。古人之集大成完全是靠人脑,是有限的。而在当今的信息时代,有了计算机和信息网络这一套技术,通过人·机结合和人·网结合,完全可以做到集其大成。其结果必能迸发出新的思想火花,得到一个升华的新的认识,所以他提出集大成得智慧。钱老并把这套方法称为“大成智慧工程”。这些进展代表了钱老系统工程和系统科学思想发展的第二个里程碑。

从系统工程的提出开始,钱老就很重视方法论问题。早期他提得比较多的是定性与定量相结合的方法。后来他根据毛主席《实践论》的观点,即人认识客观世界的规律是从感性认识到理性认识,于是便更准确地提出从定性到定量综合集成法。看起来这只是文字上有一点差异,而事实上这是非常不同的两种思路。从科学发展的过程来看,这个方法论是把还原论与整体论结合起来,既超越了还原论也发展了整体论,是系统学的一种新的方法论。其理论基础是思维科学;方法基础是系统科学与数学;技术基础是以计算机为主的现代信息技术;哲学基础是马克思主义实践论与认识论;实践基础是系统工程的实际应用。

钱老不仅是位科学家,还是位思想家。大科学家到了晚年常常会讲些哲学问题,而且一般物理学家讲得较多,比如爱因斯坦、玻尔等。化学家就很少。而作为工程技术专家可能极少见。钱老毕竟是从工程技术学科走过来的,所以他总是强调实践,强调在理论的指导下,把具体的东西做出来,即使他到了哲学层次,还是没有忘记科学技术的底蕴。

这本书所收集的是钱老在系统科学思想发展的第二阶段上所发表的讲话、论文和书信,其中绝大部分是从未发表过的。从这些讲话、论文和书信中,可以看出

他的系统科学思想发展的历程,其理论和方法研究的深度和广度。

出版这本文集是为了把钱老创建系统科学理论与方法的原始创新思想奉献给广大读者,以引起更多人的兴趣和研究,把我国系统工程和系统科学事业更快地发展起来。

展望新世纪系统工程、系统科学的发展,我想用古人的两句诗来表达我的想法:“江山代有人才出,各领风骚数百年。”中国古代整体论的思想,曾创造了辉煌的中华文化;而还原论从牛顿开始,领了数百年风骚。钱老将两者结合起来,提出了系统论。我相信系统论思想和系统科学在 21 世纪一定会有更大的发展!

在写这个序时,我非常高兴。为表达我对钱老的敬意,特赋诗一首,作为这篇序的结束语。

### 水龙吟

——祝贺学森先生九旬华诞

思如天马行空,真知灼见常相透。  
工程智慧,斤称研讨,以人为首。  
洞察毫微,纵观经纬,虑深谋久。  
看新声时创,风骚先领,常三载,超前走。  
  
素喜亲书函牍,几曾经,假他人手  
桐阳论学,春风满座,十年相守。  
万卷胸中,千行笔底,有谁堪偶,  
喜欣逢盛世,金樽玉酒,为先生寿。

2001年8月21日

## 编辑说明

钱学森是一位杰出的科学家、思想家。在他辉煌的科学生涯中,曾建树了应用力学、喷气推进理论、工程控制论、物理力学和我国火箭、导弹及航天事业的许多丰碑。同时出于对祖国建设事业的关切,他又将先前研究的工程控制论,结合中国导弹和航天器系统的研制和管理经验,提炼成系统工程理论,并运用于军事运筹、农业、林业……乃至整个社会经济系统等各个方面,为祖国现代化建设发挥了重要作用。

1991年10月,在国务院、中央军委授予他“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”。并说:“我在今后的余生中就想促进一下这件事情”<sup>[1]</sup>。

事实上,钱学森的这项研究工作早在20世纪70年代末就开始了,当时他即将从国防科研一线领导岗位上退下来。从那时起,他把主要精力集中在系统工程的推广应用和系统科学理论的探索和研究上。这20多年的时间,是钱学森系统思维、系统思想非常活跃的时期。一方面是面向社会实践的应用;另一方面是面向理论的创新。把理论和实践紧密结合起来,是钱学森从事科学技术研究的一贯特点。在大力推动系统工程应用的同时,他提出了一个清晰的现代科学技术体系结构,并具体论述了系统科学体系结构。指出系统科学如同自然科学、社会科学、思维科学、数学科学等一样,是现代科学技术体系中的一个科学技术部门。在系统科学体系中,处在应用技术层次上的就是系统工程,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)。系统学是研究系统一般规律的基础科学,这是一门尚待建立的新兴学科。1979年,钱老在一次学术报告中,就提出了建立系统学的任务<sup>[2]</sup>。

为了建立系统学,钱学森一方面推动系统工程的应用,另一方面采取了讨论班的方式。20世纪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,而且还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

## 创建系统学

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。

在以上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观点,提炼了很多重要的科学概念,建立了新的系统方法论。所有这些对创建系统学和发展系统科学,都具有重要的科学价值和深远的学术影响。

这本文集所收集的正是这段时间他所发表的有关讲话、论文和书信。从这些文字中,可以看出钱学森的系统科学思想发展历程、原始创新思想以及系统理论与方法研究的深度和广度。这些进展也标志着钱学森的系统思想、系统方法、系统理论和系统应用进入了一个新的阶段,达到了新的高度。它是钱学森科学精神、科学思想和科学方法的重要组成部分。

这里需要说明的是,1982年湖南科学技术出版社出版了钱学森等著《论系统工程》一书,1988年又出版了该书的增订本。这两本书虽以系统工程为主,但其中不少内容已涉及到系统学和系统科学的有关问题。在编辑本书时,我们收集的部分论文,重点是20世纪80年代末到现在已正式发表的,以论文形式发表的讲话也编入此类。而上述两本书内有关的论文就不再收入本书了。至于书中的讲话和书信部分,则是从未发表过的。

为了便于读者理解本书的内容,我们将在下面作扼要说明,并提供一些有关的科学背景情况。

—

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。明确指出了系统学的学科性质,是关于一切系统的一般性理论,属于基础科学。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,就可写出系统学这本书”<sup>[3]</sup>。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,还从其他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系统自组织理论等。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。

正是在钱老这种思想指导下,就与系统学有关的学科理论,如动力系统理论、混沌理论、现代控制理论、耗散结构理论、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。本书所收集的钱老讲话,主要就是他在历次讨论班上总结性发言的精彩部分。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年到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的,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。

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(系统的演化、协同与控制)一般规律的科学。对于所有系统来说,系统结构和外部环境决定了系统功能;系统结构及外部环境的改变必然引起系统功能的变化。揭示这些规律便是系统学的基本任务。把控制的思想 and 概念引入到系统学,是钱老一个很重要的学术思想。系统学不仅要揭示的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,使系统具有我们所希望的功能。这正是体现了认识客观世界的目的是为了能够更好地适应和改造客观世界这一马克思主义的基本原理。

钱老对系统学的上述定义,比他20世纪80年代初对系统学的认识又深化了一步。以这个概念和思想为核心,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,这就形成了系统学的基本框架。由许国志院士主编的《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,就是按照这一框架编写的。

·钱学森认为,系统学的建立是一次科学革命,它的重要性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(典型尺度约为 $10^{-15}$ 厘米)研究上的科学革命,相对论是宇观层次(典型尺度约为 $10^{21}$ 米)研究上的科学革命,那么系统学则是宏观层次(典型尺度约为 $10^2$ 米)研究上的科学革命。宏观层次就是我们人类生活的这个世界。在这个层次上出现了生命和生物,产生了人类和人类社会。复杂巨系统的研究以及国外的复杂性研究,都是着眼于这个层次上的。

## 二

建立系统学必然要涉及到一些基本概念和方法论问题。钱老提出的开放的复杂巨系统及其方法论,是系统学研究中最重要进展的标志。

钱学森指出,系统科学是从事物的部分与整体、局部与全局以及层次关系的角度来研究客观世界的。能反映事物这个特征的最基本的概念是系统。系统是由一些相互关联、相互作用、相互制约的组成部分所构成的具有某种功能的整体,这是国内外学术界普遍公认的科学概念。这样定义的系统在自然界、人类社会包括人自身是普遍存在的,因而现实生活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<sup>[4]</sup>,而美国圣菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)科学家们的复杂性研究<sup>[5]</sup>,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。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,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。近十多年来,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问题的,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”<sup>[6]</sup>。看来他们也意识到要把复杂性和系统概念结合起来。但在复杂性问题上,钱学森和国外科学家们不同,他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。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”<sup>[7]</sup>。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,钱老就从系统学的角度,给了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。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他已有方法所能处理的,需要有新的方法和方法论。从这个意义上说,这确实是一个科学新领域。

还原论方法在自然科学领域中取得了巨大成功。但“还原论的不足之处正日益明显”<sup>[6]</sup>。比较早意识到这一点的科学家是贝塔朗菲(L. von Bertalanffy),他本人是位理论生物学家,当生物学研究已深入到分子层次时,用他本人的话来说,他对生物整体的认识反而模糊了。于是他转向整体论和整体论方法,提出了一般系统论。贝塔朗菲的一般系统论对系统科学的产生与发展做出了重要贡献。但限于当时的科学技术水平,他没有解决整体论方法的具体问题。钱老指出“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”<sup>[8]</sup>。

钱学森是一位自觉应用马克思主义哲学指导自己研究工作的科学家。他在给一位朋友的信中说:“我近 30 年来一直在学习马克思主义哲学,并总是试图用马克思主义哲学指导我的工作。马克思主义哲学是智慧的源泉!”<sup>[9]</sup>。正是因为这个原因,他在吸取国外现代科学技术进展的同时,又能去掉他们的种种局限,站得比外国科学家更高一些。

他在毛泽东的《实践论》指导下,从实际出发,不断总结、提炼一些成功的实践经验。20世纪80年代初,在军事系统研究中,他提出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年代初,他在国防科工委科技委指导了几项复杂武器系统的定量研究;20世纪80年代中,他又对一项关于社会经济系统的研究十分重视。这些研究成为他后来提出“从定性到定量综合集成方法”的重要实践依据。考虑到保密问题,在这里我们仅就关于社会经济系统的研究做较深入的说明,使大家对从定性到定量综合集成法有一个较为具体的感性认识。这也是钱老在讲话中多次提到的一项工作,是我们需要向读者交代清楚的一个实际背景。

这项工作始于20世纪80年代初,即1983年到1985年间,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增长速度。

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各方面专家的理论、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,必须首先用系统科学的术语来界定有关概念。在此课题中,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、相互影响并具有某种功能的系统。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及有关信息资料,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,并没有工程系统那样的定量规律可循,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。所有这些都是这类复杂问题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,再请专家评议。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,选择了五种政策建议,供中央领导决策参考。这就是钱老在讲话中多次提到的关于经济系统的一项定性定量相结合的研究中的情况。

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,解决了目前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,计算机的其他功能尚未发挥出来。

尤其需要加以说明的是,钱老指出当前这场以计算机、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。进而不仅将推动思维科学的发展,而且如果把信息革命的成果,如专家系统、知识工程引入这类工作,必将有利于更进一步完善和发展定性定量相结合的综合集成方法,提高集成专家意见的智能化水平。

在以上这些研究进展的基础上,20世纪90年代初,钱老提出了“从定性到定量综合集成方法”和“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),并把运用这套方法论的集体称为总体设计部(Department of Integrative System Design)。他多次呼吁成立国家社会主义建设总体设计部,运用这套综合集成方法,对社会主义建设的长远问题进行科学规划和预测,改变目前那种“摸着石头过河”的局面。

应该补充说明的是,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”。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。

综合集成方法论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·网络结合的系统。钱老指出,这个系统本身也是个开放的复杂巨系统。它的成功应用,就在于发挥这个系统的综合优势、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。在这里值得指出的是,钱老倡导的方法论是人·机结合,以人为主的路线;而圣菲研究所的科学家们走的是人·机结合,以机器(即计算机)为主的路线。

在应用这个方法时,也需要对系统进行分解,在分解研究的基础上再综合集成到整体,实现 $1+1>2$ 的飞跃,达到从整体上研究和解决问题的目的。这也就是说,综合集成方法其实是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。它是还原论方法和整体论方法的辩证统一,即系统论方法。从这个角度来看,综合集成方法既超越了还原论方法,又发展了整体论方法。综合集成方法作为科学方法论,其理论基础是思维科学,方法论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,实践基础是系统工程的实际应用,哲学基础是马克思主义实践论和认识论。

美国圣菲研究所的科学家们在复杂性研究方法上确有许多创新之处,如他们提出的遗传算法,开发的 swarm 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。但在方法论上,虽然他们意识到还原论方法处理不了复杂性问题,但并没有开辟出新的途径,因而感到困惑。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的方法问题。如果方法论不对头,再好的具体方法也只能解决枝节问题,而解决不了复杂性的根本问题。钱学森的“从定性到定量综合集成方法”和“从定性到定量综合集成研讨厅体系”恰恰是从方法论上给出了研究和解决复杂巨系统和复杂性问题的有效途径,这是方法论上的创新。有了这套方法论再结合到具体的复杂巨系统就可以开发出一套方法体系,不同的复杂巨系统,方法体系可能是不同的,但方法论却是相同的。由国家自然科学基金委员会管理科学部与信息科学部联合资助的、由戴汝为院士主持的重大项目:“支持宏观经济决策的人·机结合的综合集成体系研究”,一直受到钱老的关心,该项目就是在这个方法论的指导下,结合经济系统所进行的方法体系研究。

方法论的创新,将孕育着伟大的科学革命。F·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,因而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,综合集成方法论必将推动 21 世纪系统科学的大

发展。

### 三

对于开放的复杂巨系统的研究,钱学森指出,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,就可以逐步建立其理论。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。

钱老还进一步指出,在开放的复杂巨系统中,实践经验和资料积累最丰富的是社会系统和人体系统。社会科学对社会问题的研究,已经有了很长的历史,取得了丰硕的成果,如把社会科学、系统科学、自然科学、数学科学等结合起来,采用综合集成方法进行研究,就会取得新进展,开辟出新的前景。

钱老非常重视社会系统的研究,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”<sup>[10]</sup>。社会形态的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:①社会主义物质文明建设,包括科技经济建设、人民体质建设;②社会主义政治文明建设(在中央文件中通常称做民主与法制建设),包括民主建设、法制建设、政体建设;③社会主义精神文明建设,包括思想建设和文化建设;④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系,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