

## 主 编 语

钱学森先生创办了《系统工程理论与实践》，并一直担任中国系统工程学会名誉理事长。今年恰逢钱老诞辰 105 周年，也是中国航天 60 周年。本刊特别邀请著名系统工程专家于景元先生撰写此文，以此来纪念钱老，并进一步推动钱老等老一辈科学家开创的系统科学和系统工程在中国的发展！

汪寿阳  
2016 年 11 月 1 日

doi: 10.12011/1000-6788(2016)12-2993-10

中图分类号: N94

文献标志码: C

## 从系统思想到系统实践的创新 —— 钱学森系统研究的成就和贡献

于景元

(中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048)

**摘 要** 本文介绍了钱学森从系统思想到系统实践创新过程所取得的成就和贡献, 包括建立系统科学体系与系统认识论、系统综合集成方法体系与系统方法论以及系统工程与系统实践论。它们分别反映了钱学森系统科学思想、系统综合集成思想和系统实践思想也就是系统工程思想。这些成就具有重要的科学价值和实践意义以及现实意义。

**关键词** 系统科学; 综合集成; 系统工程; 钱学森

## Innovation process from systems thinking to systems practice — In memory of Hsue-shen Tsien

YU Jingyuan

(China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China)

**Abstract** This article introduces Hsue-shen Tsien's achievements and contributions in the innovation process from systems thinking to systems practice in details, including establishing systems science architecture and the epistemology of systems, systems synthesis architecture and the methodology of systems, systems engineering and the practices of systems. They reflect Tsien's thoughts on systems science, thoughts on systems synthesis, thoughts on systems practice which is thoughts on systems engineering. These achievements have important value on science, great practical meaning and present significance.

**Keywords** systems science; systems synthesis; systems engineering; Hsue-shen Tsien

收稿日期: 2016-10-20

中文引用格式: 于景元. 从系统思想到系统实践的创新 —— 钱学森系统研究的成就和贡献 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(12): 2993-3002.

英文引用格式: Yu J Y. Innovation process from systems thinking to systems practice — In memory of Hsue-shen Tsien[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(12): 2993-3002.

今年 4 月 24 日是首个中国航天日。同时,今年也是中国航天 60 周年。人们很自然会想起中国航天事业的开创者和奠基人——钱学森。而今年又恰好是钱老诞辰 105 周年,这些都引起我们对钱老的深切回忆和无限怀念。本文对钱老从系统思想到系统实践整个创新过程所取得的成就和贡献作些介绍,以此来纪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,钱老建树了许多科学丰碑,对现代科学技术的发展和我国社会主义现代化建设,都做出了重大贡献。

钱学森的科学精神与品德、科学思想与方法、科学成就与贡献,是留给我们宝贵的知识财富、思想财富和精神财富。我们应该认真学习、研究和应用并发扬光大。

以导弹、卫星等航天科技为代表的大规模科学技术工程,既有科学层次上的理论问题要研究,又有技术层次上的高新技术要开发,同时还要把这些理论和技术应用到工程实践中,生产出产品来。如何把成千上万人组织起来,以较少的投入在较短时间内,研制出高质量、高可靠的型号产品,这不仅需要科学和技术创新,还需要一套科学的组织管理方法与技术。

钱老回国前,已在应用力学、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,同时还创建了“物理力学”和“工程控制论”,成为国际上著名科学家。工程控制论已跨出了自然科学领域,而进入到系统科学领域。系统科学思想、理论方法与技术,使钱老具有更开阔的学术视野和更广泛的学术优势。正是以上这些科学技术成就和优势,在开创我国航天事业过程中,钱老始终处在“科技主帅”的位置上。

钱老在开创我国航天事业中,同时也开创了一套既有普遍科学意义,又有中国特色的系统工程管理方法与技术。当时研制体制上是规划、研究、设计、实验、试制和生产一体化;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的科学性和有效性。从今天来看,就是在当时条件下,把科学技术创新、组织管理创新和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自主创新和协同创新的道路,使我国航天事业一直在持续发展。

航天系统工程的成功实践,不仅开创了大规模科学技术工程实践的系统工程管理范例,而且也为钱老后来发展系统工程、建立系统科学体系和系统论提供了雄厚和坚实的实践基础。

1978 年,钱学森等发表了《组织管理的技术——系统工程》一文<sup>[1]</sup>,明确提出了系统工程是组织管理系统的技术,是对所有系统都适用的技术和方法。这篇文章产生了广泛而深远的学术影响,具有里程碑的意义。当时国际上对系统的认识还很混乱,呈现出“人各一词、莫衷一是”的局面。这篇文章却使系统工程呈现出“分门别类、共居一体”的新局面。

20 世纪 80 年代初钱老从科研一线领导岗位上退下来以后一直到晚年,就把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,原始创新性之强,在学术界是十分罕见的。在这个时期中,钱老花费很大心血去大力推动系统工程在各个领域中的应用;同时又开始了创建系统学和建立系统科学体系与系统论的工作。在创建系统学过程中,提出了开放的复杂巨系统及其方法论,由此又开创了复杂巨系统科学与技术这一新的科学领域。这些成就标志着钱学森系统思想、系统理论、系统方法和系统技术与系统应用有了新的进展,达到了新的高度,进入了新的阶段。

在这个阶段中,从系统思想到系统实践的整个创新链条上,在工程、技术、科学直到哲学的不同层次上,钱老都做出了开创性的系统贡献。不仅建立了系统科学和复杂巨系统科学体系以及综合集成方法体系,同时还把系统工程从工程系统工程发展到了复杂巨系统工程和社会系统工程,并将其应用到更广泛和更复杂的社会实践中。在取得这些成就的过程中,也就形成了钱学森系统科学思想和系统论,这又大大的丰富和发展了系统思想。

从现代科学技术发展趋势和特点来看,以下几个主要方面都与系统科学密切相关:

#### 1. 现代科学技术发展呈现出既高度分化又高度综合的两种明显趋势

一方面已有的学科和领域越分越细,新学科新领域不断产生;另一方面是不同学科、不同领域相互交叉、结合与融合,向综合集成的整体化方向发展,这两者是相辅相成,相互促进的。系统科学和系统工程就是这后一发展趋势上的科学技术。

#### 2. 复杂性科学的兴起引起国内外的高度重视

20 世纪 80 年代中,国外出现了复杂性研究。复杂性研究和复杂性科学是处在高度综合这个趋势上,与系统科学有着密切的关系。

复杂性研究和复杂科学的开创者之一 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在一起, 有些事实和想法初看起来彼此风马牛不相及, 但新的方法却很容易使它们发生关联”。

这里, Gell-mann 并没有说明这个新途径和新方法是什么, 但从他们后来关于复杂系统和复杂适应系统的研究中可以看出, 这个新途径就是系统途径, 这个新方法就是系统方法。

### 3. 科学方法论的发展

从近代科学到现代科学的发展过程中, 科学方法论经历了从还原论方法到整体论方法再到系统论方法。系统论方法的产生与系统科学的出现和发展紧密相关。

4. 以计算机、网络和通信为核心的现代信息技术革命, 改变了人类思维方式, 出现了人、机结合以人为主的思维方式, 这种思维方式比人脑思维具有更强的思维能力和创造性, 使人类更加聪明了, 有能力去认识和处理更加复杂的事物。这种思维方式也为系统论方法提供了理论基础和技术基础。

### 5. 创新方式的转变

由以个体为主向以群体为主的创新方式转变, 出现了创新体系, 特别是国家创新体系已成为创新驱动发展的强大动力。

6. 现代社会实践越来越复杂, 越复杂的社会实践其综合性和系统性就越强, 因而也就更加需要系统科学和系统工程。

钱学森系统科学思想和系统科学体系集中地体现出以上这些特点。

## 1 系统科学和系统论

钱学森指出, 系统科学的出现是一场科学革命。科学革命是人类认识客观世界的飞跃, 那么, 系统科学究竟是研究什么的学问, 又为什么如此重要?

从辩证唯物主义观点来看, 客观世界的事物是普遍联系的, 正如马克思所说“世界是普遍联系的整体, 任何事物内部各要素之间及事物之间都存在着相互影响, 相互作用和相互制约的关系”。既然客观事物是普遍联系的整体, 那就一定有其客观规律, 我们也就应该研究、认识和运用这些规律。

能够反映和概括客观事物普遍联系这个实际和本质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联系、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。这样定义的系统在客观世界是普遍存在的。客观世界包括自然、社会和人自身。马克思这里所说的客观世界是普遍联系的整体就是辩证唯物主义系统思想。

正是从系统思想出发并结合现代科学技术的发展, 钱学森明确提出, 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, 也就是从系统角度来研究客观世界。系统是系统科学研究和应用的基本对象。

系统科学和自然科学、社会科学等不同, 但有深刻的内在联系。系统科学能把自然科学、社会科学等领域研究的问题联系起来作为系统进行综合性、整体性研究。这就是为什么系统科学具有交叉性、综合性和整体性的原因。也正是这些特点, 使系统科学处在现代科学技术发展综合集成的整体化方向上, 并已成为现代科学技术体系中一个新兴的科学技术部门。

系统结构、系统环境和系统功能是系统的三个重要基本概念。系统结构是指系统内部, 系统环境是指系统外部。系统的一个最重要特点, 就是系统在整体上具有其组成部分所没有的性质, 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。系统的这个性质意味着, 对于系统应首先注重整体, 如果仅着眼于部分, 即使组成部分都认识了, 并不等于认识了系统整体, 系统整体性不是它组成部分性质的简单“拼盘”, 而是系统整体涌现的结果。

系统研究表明, 系统结构和系统环境以及它们之间关联关系, 决定了系统的整体性和功能, 这是一条非常重要的系统规律。从理论上来看, 研究系统结构与环境如何决定系统整体性和功能, 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的基本任务。国外关于复杂性研究, 实际上也属于系统理论方面的探索<sup>[10]</sup>。

另一方面, 从应用角度来看, 根据上述系统原理, 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组织、调整、改变和设计的.这样,我们便可以通过组织、改变、调整系统组成部分或组成部分之间、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,也就是把整体和部分辩证统一起来,从而在系统整体上涌现出我们希望的最好的功能,这就是系统组织管理、系统控制和系统干预(Intervention)的基本内涵,是系统管理、系统控制等学科要研究的基本科学问题,也是系统工程、控制工程等所要实现的主要目标.

科学是认识世界的学问,技术是改造世界的学问,而工程是改造客观世界的实践.从这个角度来看,系统科学和自然科学等类似,也有三个层次的知识结构,即工程技术(应用技术)、技术科学(应用科学)和基础科学.

在钱学森建立的系统科学体系中:

1. 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,它是组织管理系统的技术;
2. 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;
3. 处在基础科学层次上属于基础理论的便是系统学和复杂巨系统学.

目前国外还没有这样一个清晰和严谨的系统科学体系结构.

在建立系统科学体系的同时,钱老还提出和建立了系统论.系统论属于哲学层次,是连接系统科学与辩证唯物主义哲学的桥梁.一方面,辩证唯物主义通过系统论去指导系统科学的研究;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.

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>[2]</sup>.根据系统论这个思想,对于系统问题首先要着眼于系统整体,同时也要重视系统组成部分并把整体和部分辩证统一起来,最终是从整体上研究和解决问题,既超越了还原论又发展了整体论,这就是系统论的优势所在.

运用系统论去研究和认识系统,揭示系统客观规律和建立系统的知识体系,就是系统认识论.从这个角度来看,系统科学及其体系就是系统认识论的体现.

综上所述,系统思想是辩证唯物主义哲学内容,系统科学体系和系统论的建立,就使系统思想从一种哲学思维发展成为系统的科学体系,系统科学体系是系统科学思想在工程、技术、科学直到哲学不同层次上的体现.这就使系统思想建立在科学基础上,把哲学和科学统一起来,也把理论和实践统一起来了,这就形成了钱学森系统科学思想.钱学森系统科学思想丰富和发展了辩证唯物主义系统思想.

## 2 复杂巨系统和系统方法论

在系统科学体系中,系统学和复杂巨系统学是需要建立的新兴学科,这也是钱老最先提出来的.

20 世纪 80 年代中,钱老以“系统学讨论班”的方式开始了创建系统学的工作.从 1986 年到 1992 年的 7 年时间里,钱老参加了讨论班的全部学术活动.在讨论班上,钱老根据系统结构的复杂性提出了系统新的分类,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、社会系统、地理系统、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,又称作特殊的复杂巨系统.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,所以又称作开放的复杂巨系统<sup>[3]</sup>.

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.形成了以简单系统、简单巨系统、复杂系统、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.

对于简单系统和简单巨系统都已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.但对复杂系统、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.所以,关于复杂系统和复杂巨系统(包括社会系统)的理论研究,钱老又称作复杂巨系统学.

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的问题更加复杂,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”<sup>[5]</sup>. 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>[4]</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 (包括社会系统) 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得越多, 对生物整体反而认识得越模糊. 在这种情况下, 于 20 世纪 40 年代他提出了一般系统论, 实际上是整体论, 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”<sup>[1]</sup>. 但整体论的提出, 确实对现代科学技术发展的重要贡献.

20 世纪 80 年代中期, 国外出现了复杂性研究. 关于复杂性, 钱老指出: “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>[3]</sup>. 系统整体性, 特别是复杂系统和复杂巨系统 (包括社会系统) 的整体性问题就是复杂性问题. 所以对复杂性研究, 国外科学家后来也“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”<sup>[5]</sup>. 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、基于 Agent 的系统建模、用 Agent 描述的人工生命、人工社会等等. 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. 所以方法论更为基础也更为重要.

如前所述, 钱学森明确指出系统论是整体论与还原论的辩证统一. 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. 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, 实现系统的整体涌现, 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, 这就是把整体和部分辩证统一起来研究和解决系统问题的系统方法论, 系统方法论反映了钱学森系统综合集成思想. 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.

20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 结合现代信息技术的发展, 钱学森又先后提出“从定性到定量综合集成方法” (Meta-synthesis) 及其实践形式“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. 这就将系统方法论具体化了, 形成了一套可以操作且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.

综合集成方法的实质是把专家体系, 数据、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、智能和智慧优势. 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、资料和信息系统集成起来, 从多方面的定性认识上升到定量认识.

钱老提出的人·机结合以人为主要的思维方式是综合集成方法的理论基础. 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.关于人脑思维,钱老指出“逻辑思维,微观法;形象思维,宏观法;创造思维,宏观与微观相结合.创造思维才是智慧的源泉,逻辑思维和形象思维都是手段”<sup>[5]</sup>.

现在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,已有许多科学成就证明了这一点,如著名数学家吴文俊的定理机器证明.但在形象思维方面,今天的计算机还不能给我们以很大的帮助.至于创造思维就只能依靠人脑了.然而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的思维方式,那就更有优势,思维能力更强,人将变得更加聪明,它的智能和智慧与创造性比人要高,比机器就更高,这也是  $1 + 1 > 2$  的系统原理(见图 1).

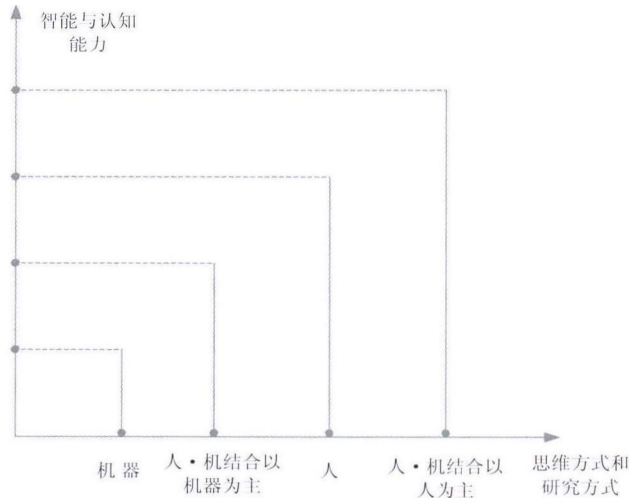


图 1 思维方式和研究方式与认知能力的关系

从图 1 可以看出,人 - 机结合以人为主的思维方式,它的智能、智慧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.

信息、知识和智慧是三个不同层次的问题.有了信息未必有知识,有了信息和知识也未必就有智慧.信息的综合集成可以获得知识,信息和知识的综合集成可以获得智慧.人类有史以来是通过人脑获得知识和智慧的.现在由于以计算机为主的现代信息技术的发展,我们可以通过人·机结合以人为主的方法来获得信息、知识和智慧,而且比人脑还有优势,这是人类发展史上具有重大意义的进步.

综合集成方法就是这种人·机结合以人为主获得信息、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.

综合集成方法既可用于理论研究,也可用于应用研究.

从实践论和认识论角度来看,与所有科学研究一样,无论是复杂系统和复杂巨系统(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.

但对复杂系统和复杂巨系统(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和复杂巨系统(包括社会系统)问题提出经验性假设.这就是为什么综合集成方法需要有专家体系.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. 采用“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, 从而对经验性假设正确与否做出科学结论. 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: 1、定性综合集成, 2、定性、定量相结合综合集成, 3、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. 复杂系统与复杂巨系统 (包括社会系统) 问题, 通常是非结构化问题, 现在的计算机只能处理结构化问题. 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.

图 2 是综合集成方法用于决策支持问题研究的示意图.

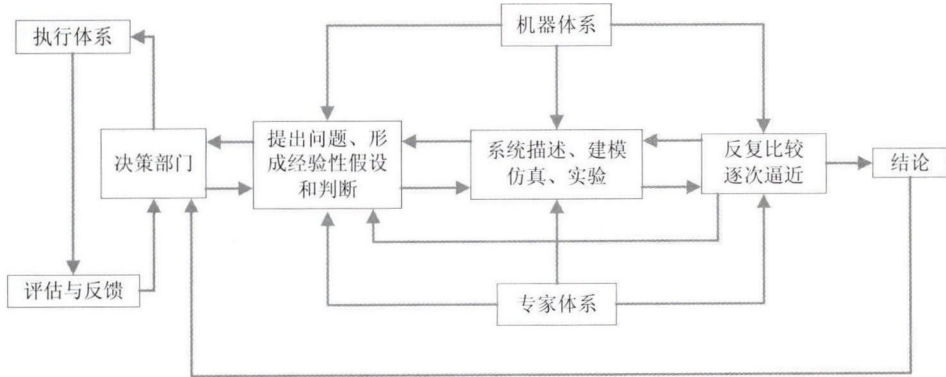


图 2 综合集成方法用于决策支持问题研究示意图

这套方法是目前处理复杂系统和复杂巨系统 (包括社会系统) 的有效方法, 已有成功的案例证明了它的科学性和有效性.

综合集成方法的理论基础是思维科学, 方法论和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, 哲学基础是系统论和辩证唯物主义的实践论与认识论.

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、跨领域和跨层次问题研究的方法论和方法, 它必将对系统科学体系不同层次产生重要影响, 从而推动了系统科学的整体发展.

20 世纪 90 年代中, 钱老提出开创复杂巨系统的科学与技术.

由于有了综合集成方法, 可以在科学层次上建立复杂巨系统理论, 也就是综合集成的系统理论, 它属于复杂巨系统学的内容. 虽然这个一般理论目前尚未完全形成, 但有了研究这类系统的方法论与方法, 就可以逐步建立起这个一般理论来, 这是一个科学新领域.

另一方面, 在技术层次上运用综合集成方法可以发展复杂巨系统技术, 也就是综合集成的系统技术, 特别是复杂巨系统的组织管理技术, 大大地推动了系统工程的发展.

系统工程是组织管理系统的技术, 是组织管理系统规划、研究、设计、实现、试验和使用的技术和方法. 它的应用首先是从工程系统开始的, 如航天系统工程. 但当我们用工程系统工程来处理复杂巨系统和社会系统时, 处理工程系统方法就暴露出了局限性, 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, 系统工程方法也要发展. 由于有了综合集成方法, 系统工程可以用来组织管理复杂巨系统和社会系统了. 这样, 系统工程也就从工程系统工程发展到了复杂巨系统工程和社会系统工程, 是现在就可以应用的组织管理复杂巨系统和社会系统的系统工程技术.

由于实际系统不同, 将系统工程用到哪类系统上, 还要综合集成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科学等方面的知识. 从这些特点来看, 系统工程不同于其它技术, 它是一种把整体和部分协调统一起来的整体性技术、一类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. 正如钱老指出的: “系统工程在组织管理技术和方法上的革命作用, 也属于技术革命”.

钱老开创复杂巨系统的科学与技术, 实际上是由综合集成思想、综合集成方法、综合集成理论、综合集

成技术和综合集成工程所构成的综合集成体系,也就是复杂巨系统科学体系,在哲学层次上就是大成智慧学.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体系.

现代科学技术的发展一方面呈现出高度分化的趋势;另一方面又呈现出高度综合的趋势.系统科学、复杂巨系统科学就是这后一发展趋势中最具有基础性和应用性的学问,它对现代科学技术发展,特别对现代科学技术向综合集成的整体化方向发展,必将产生重大影响,将成为一门 21 世纪的科学.

3 系统工程和系统实践论

系统科学思想、系统科学和复杂巨系统科学体系,不仅有重要的科学价值,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,并有高度的综合性、系统性和动态性.社会实践通常包括三个重要组成部分:一是实践对象,就是干什么,它体现了实践的目的性;二是实践主体,是由谁来干和怎么干,它体现了实践的组织性;三是决策主体,它最终要决定干不干和如何干的问题.

从系统观点来看,任何一项社会实践,都是一个具体的实践系统.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.正如钱老所说“任何一种社会活动都会形成一个系统,这个系统的组织建立、有效运转就成为一项系统工程”[3].

这样一来,有关社会实践或工程的组织管理与决策问题,也就成为系统的组织管理和决策问题.在这种情况下,系统科学思想、系统科学理论、方法与技术,应用到社会实践或工程的组织管理与决策之中,不仅是自然的,也是必然的,它的实质就是系统实践论.这就是为什么系统科学和系统工程具有广泛的应用性以及系统科学思想指导性的原因.

但在现实中,真正从系统角度去考虑和处理社会实践和工程问题并用系统工程去解决问题,还远没有深入到各类实践之中.人们在遇到涉及的因素多而又复杂且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,如上所述,这是系统的实践或系统的工程;另一层含义是从科学技术角度来看,既然是系统的工程或实践,它的组织管理就应该用系统工程技术去处理,因为系统工程就是直接用来组织管理系统的技术.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,但却忽视或不了解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,但又没有用系统工程去解决问题的局面.

要把系统工程技术应用到实践中,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的应用了系统工程技术.以导弹、卫星等航天科技为代表的大规模科学技术工程是一项复杂的社会实践,用图 3 说明.

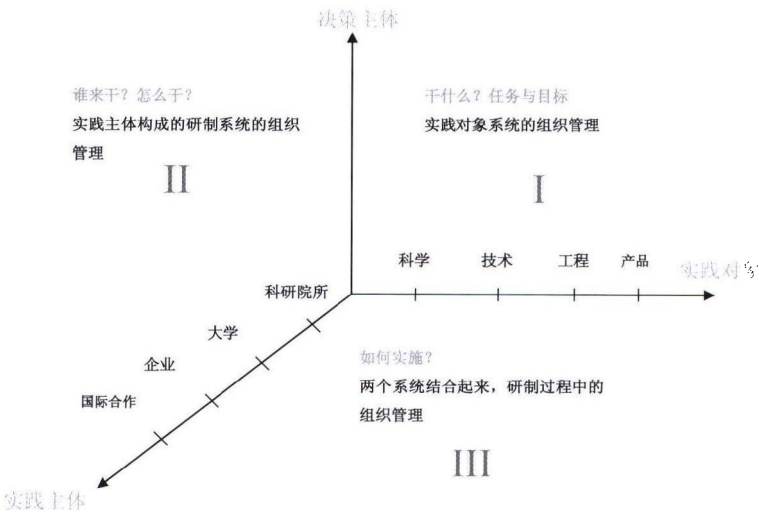


图 3 大规模科学技术工程是一项复杂的社会实践

应用系统工程到实践对象系统(第一象限 I),首先是从整体上研究和解决问题,即用哪些科学技术成果组成一个对象系统(工程系统),使其具有我们期望的功能.这就涉及到系统结构、系统环境和系统功能.完成这项工作需要有个研究实体,这就是总体设计部.总体设计部是由熟悉这个对象系统的各方面专业人员组



成,并由知识面较为宽广的专家(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。

总体设计部把型号工程系统作为它所从属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(型号系统的系统环境),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(型号系统的系统结构),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(型号系统的系统功能)的要求来协调和解决。运用系统方法并综合集成有关学科的理论和技术,对型号工程系统结构、系统环境与系统功能进行总体分析、总体论证、总体设计、总体协调、总体规划,把整体和部分协调统一起来,其中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总体方案,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,再由相关部门付诸实施。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。

再看第二象限 II,根据已确定的总体方案,需要组织一个研制系统,要投入人力、财力、物力等资源。对这个研制系统的要求是合理和优化资源配置,以较低的成本,在较短的时间内研制出可靠的、高质量的对象系统(工程系统)。这也需要系统工程来组织管理这个系统。但和上述工程系统不同,这里组织管理的是研制系统和资源配置。在计划经济体制下,这个系统是靠行政力量进行组织管理的,在市场经济体制下,只靠行政系统已不完全行了,还需要市场这个无形的手。研制系统是由不同利益主体构成的,如何组织管理好这个系统,在今天来看,就显得更为复杂,这也正是需要我们创新发展的地方。

第三象限 III 是把对象系统和研制系统结合起来进行研制,这是个动态过程,既有工程系统科学技术方面的组织管理与协调,又有研制系统资源配置的组织管理与协调,这就形成了两条线,一条是总设计师负责的技术指挥线,另一条是总指挥负责的调度指挥线。这两条线也是相互协调的。

上述总体设计部所处理的对象还是个工程系统,也称作工程系统工程。但在实践中,研制系统如何合理和优化配置资源问题,也需要总体设计。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。这个新系统还涉及到体制机制、发展战略、规划计划、政策措施以及决策与管理等问题。显然,这个新系统要比对象系统复杂的多,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,这个部门就是前述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系统管理问题的系统科学思想还是一致的。总体设计部运用综合集成方法、应用系统工程技术去研究和解决系统实践的组织管理问题,也就是把系统整体和组成部分协调统一起来的系统工程管理,它是系统实践论的体现,没有这样的实体部门,应用系统工程也只能是句空话。

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,钱老在讲话中说“我认为今天的科学技术不仅仅是自然科学工程技术,而是人类认识客观世界、改造客观世界的整个知识体系,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,而且运用这个体系去解决我们中国社会主义建设中的问题”<sup>[6]</sup>。这里所说的科学体系,就是钱老建立的包括自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、行为科学、军事科学、地理科学、建筑科学、文艺理论所构成的现代科学技术体系。

现代科学技术体系为国家管理和建设提供了宝贵的知识资源和智慧源泉,我们应充分运用和挖掘这些知识和智慧,以集大成得智慧。而系统科学中的综合集成方法和大成智慧工程又为我们提供了有效的科学方法和有力的技术手段,以实现综合集成,大成智慧。这就是钱学森把系统科学特别是复杂巨系统科学和社会系统工程技术,运用到国家宏观层次组织管理的科学技术基础。为了把社会系统工程应用到国家层次上的组织管理,钱老曾多次提出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。

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、民主化和程序化。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和协同且两者优势互补,共同为决策机构服务。决策机构则把权力和科学结合起来,形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。

一个项目、一个单位、一个部门甚至一个国家的管理,都是不同类型系统的组织管理,系统管理的首要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>[7]</sup>。只有这样才能统揽全局,把所管理系统的整体优势发挥出来,收到  $1+1>2$  的效果,这就是基于系统实践论的系统工程管理方式,我国航天事业的发展就是成功的应用了系统工程管理方式。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。这种基于还原论的分散管理方式,使得系统整体优势无法发挥出来,其最好的效果也就是  $1+1=2$ ,弄不好还可能是  $1+1<2$ ,而后一种情况可能是多数。

通过以上所述可以看出,钱学森所建立的系统论,不仅包括了系统认识论和系统方法论,还包括系统实践论。它不同于贝塔朗菲的一般系统论,后者还是整体论,正如钱老所说:“我们说的系统论不是贝塔朗菲的“一般系统论”,比一般系统论深刻多了”。

系统认识论反映了钱学森的系统科学思想;系统方法论反映了钱学森的系统系统集成思想;系统实践论反映了钱学森的系统实践思想也就是系统工程思想。这样,系统科学思想、系统集成思想和系统工程思想,就构成了钱学森系统思想的主要内容,钱学森系统思想和钱学森系统论是对辩证唯物主义系统思想的重要发展和丰富。

从钱学森系统思想到系统实践所取得的成就和贡献可以看出,钱学森不仅是位科学家也是一位思想家,他的知识结构不仅有学科和领域的深度,又有跨学科、跨领域的广度,还有跨层次的高度。如果把深度、广度和高度看作三维结构的话,那么钱学森就是一位三维科学家,是一位难得的科学帅才。

以上介绍的钱学森系统研究成就和贡献,只是钱老科学技术成就和贡献的一部分。从钱学森一生全部科学技术成就来看,钱学森是中国现代史上一位伟大的科学家和思想家、科学大师和科学泰斗,也是一位极富远见的战略科学家和科学领袖。

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。

## 参考文献

- [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. 钱学森文集卷五 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [3] 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.
- [4] 李政道. 前沿科学热点话题卷首语 [J]. 科学世界, No12000.
- [5] Gallaghe R, Appenller T. 超越还原论 [M]// 戴汝为. 复杂性研究文集, 1999.
- [6] 钱学森. 关于思维科学 [M]. 上海: 上海人民出版社, 1986.
- [7] 钱学森. 在颁奖仪式上的讲话 [N]. 人民日报, 1991 年 10 月 19 日第一版.
- [8] 钱学森. 要从整体上考虑并解决问题 [N]. 人民日报, 1990 年 8 月 14 日第三版.
- [9] 许国志. 系统科学 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2004.
- [10] 郭雷. 系统学是什么 [J]. 系统与控制纵横, 2016(1).