

# 110th



## 钱学森系统科学和系统工程的 成就与贡献 ——从系统思想到系统实践的创新（上）

■ 中国航天系统科学与工程研究院 于景元

今年是著名科学家钱学森院士诞辰110周年。

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，对现代科学技术发展和我国社会主义现代化建设，都作出了巨大贡献。

• Aerospace China 2021.12 •

钱学森的科学成就与贡献、科学思想与方法、科学精神与品德,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,这也是我们纪念钱学森的最重要方面。

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和贡献来看,这只是其中一部分。实际上,钱老的研究领域非常广泛,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,特别是在不同学科、不同领域、不同层次的相互交叉、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。从现代科学技术发展来看,这些方面的成就与贡献,其意义和影响可能更大也更深远。钱学森系统科学和系统工程的成就与贡献就是其中的重要方面。

钱学森是我国系统科学和系统工程的开创者和奠基人。钱老从系统思想到系统实践的整个创新过程,都作出了开创性贡献。这些成就和贡献具有超前性、引领性和奠基性,也是目前国外所没有的。不仅对系统科学和系统工程的发展与应用,同时对其它科学技术的发展与应用,都有着重要科学价值和实践意义,以及非常重要的现实意义。

首先,我们从现代科学技术发展的整体上,来看一下系统科学和系统工程,以便了解系统科学和系统工程所具有的一些特点,以及与其它科学技术之间的关系。

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和系统工程的产生和发展密切相关:

一是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,已有学科和领域越分越细,新学科、新领域不断产生;另一方面,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,两者相辅相成相互促进。从这个发展趋势来看,系统科学和系统工程就是这后一发展趋势上的科学和技术。

二是复杂性科学的兴起引起国内外高度重视。

20世纪80年代中,国外出现了复杂性研究和复杂性科学。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关系。



图1 钱学森主持“系统学讨论班”  
(右前:钱学森,左前:于景元)

复杂性科学开创者之一、诺贝尔奖获得者物理学家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。所谓复杂性,实际上是系统复杂性,复杂性研究本来就是系统科学研究的重要内容。

三是科学方法论的发展。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。系统论方法与系统科学和系统工程的产生及发展密切相关。

四是以计算机、网络和通信为核心的现代信息革命,引起了人类思维方式的变革,出现了人·机结合、人·网结合以人为主的系统思维方式。这种系统思维方式使人类更加聪明了,有能力去认识和处理更加复杂的事物,同时也为系统论方法及其应用,提供了理论基础和技术基础。

五是创新方式的转变。由以个体为主向以群体为主的创新方式转变,出现了人·机结合、人·网结合以人为主的创新方式和创新体系,特别是国家创新体系已成为创新驱动发展的强大动力。

六是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。社会实践是系统的实践，也是系统的工程，任何一项社会实践都是一个具体实践系统的实践，因而也就更加需要系统科学和系统工程。同时，社会实践又大大地促进了系统科学和系统工程的发展和应用。

钱学森系统科学思想、系统论、系统科学和系统工程，集中地反映出以上这些特点。

## 一、系统科学和系统论

现代科学技术的发展已经取得巨大成就。钱学

森指出，今天人类正在研究和探索着从渺观、微观、宏观、宇观直到胀观五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，在地球上出现了生命和生物，产生了人类和人类社会。

从不同角度去研究客观世界的不同问题时，就产生了现在众多的学科和领域。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领域、不同层次客观规律的科学技术也是相互联系、相互作用、相互影响的知识体系，见图2和图3。

在图2里还看不到系统科学，但正是这些科学技术的发展，蕴育和产生了系统科学。

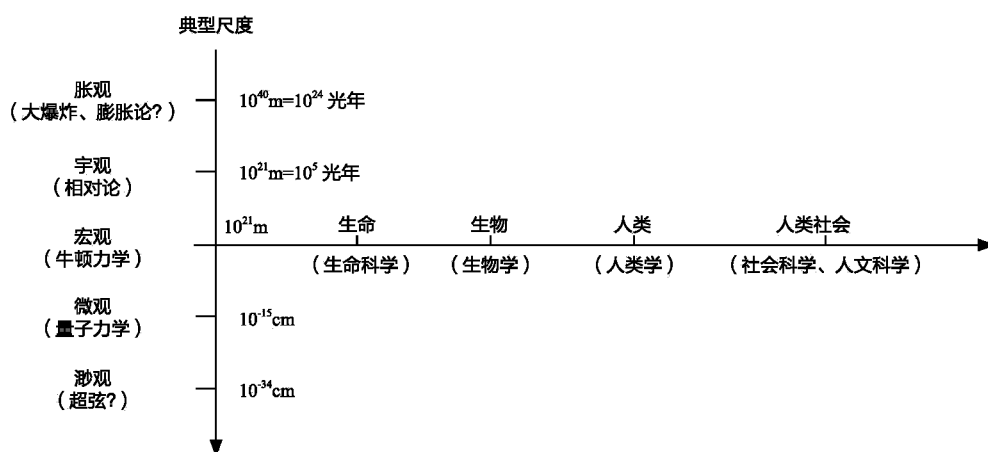


图2 时空范围的客观世界

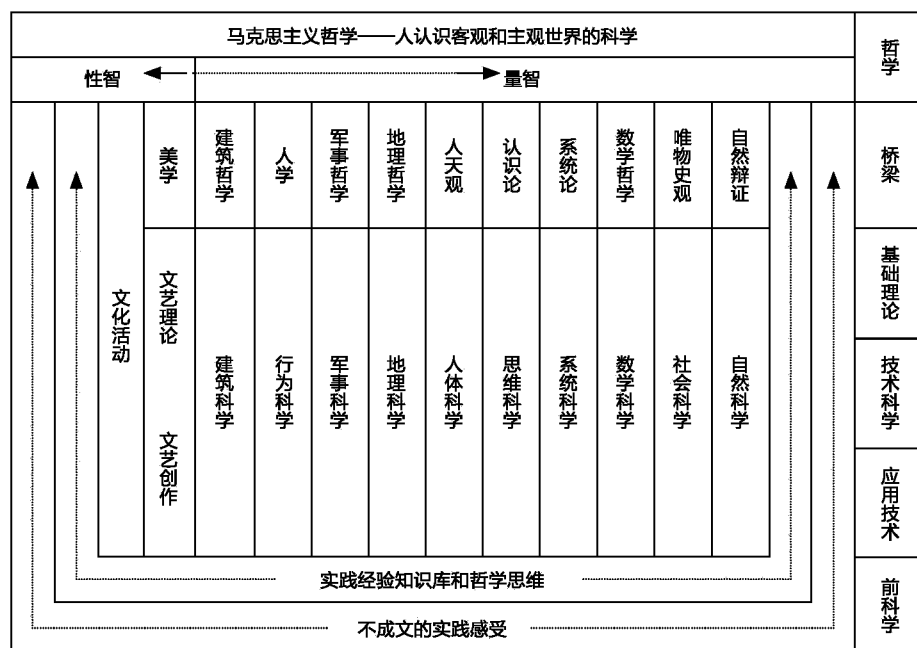


图3 人类认识世界和改造世界的知识体系

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,为什么如此重要?它和已发生过的科学革命又有什么不同?

从辩证唯物主义观点来看,客观世界的事物是普遍联系的,“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”。从辩证唯物主义这个系统思想来看,既然客观事物是普遍联系的整体,必然就有其客观规律,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客观事实和本质特征,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。这样概括和定义的系统在客观世界是普遍存在的,客观世界包括自然、社会和人身自身。

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”,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。

自然科学是从物质、物质结构和物质运动的角度来研究客观世界的;社会科学是从人类、人类社会及其发展的角度来研究客观世界的。系统科学和自然科学、社会科学等不同,但有着深刻的内在联系。系统科学可以把自然科学、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、系统性和整体性研究。这就是为什么系统科学具有交叉性、综合性和整体性。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领域。

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,包括系统组成部分及其关联关系。系统环境是指系统外部。系统最重要的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,对于系统应高度重视系统整体,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,这就有个涌现机理和规律的问题。

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,决定了系统整体性和功能。这是一条非常重要的系统原理,也是系统研究和应用的核心问题。

从理论上来看,研究系统结构与系统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质上是系统涌现性研究,也是系统理论方面的探索。

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。但系统环境一般是不能任意改变的,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可以组织、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,把系统整体和组成部分与环境辩证统一起来,使它们相互协调与协同,从而在系统整体上涌现出我们期望的和最好的功能,这就是系统控制、系统管理和系统干预(Intervention)的基本内涵,是系统管理、系统控制等学科要研究的应用理论问题,也是系统工程、控制工程等所要实现的主要目标。

从科学技术发展和工程实践来说,科学是认识世界的学问,技术是改造世界的学问,而工程是认识和改造客观世界的实践。从这个角度来看,自然科学经过几百年的发展,已有了三个层次的知识结构,即基础科学(基础理论)、技术科学(应用理论)、工程技术(应用技术)。在这一点上,系统科学和自然科学类似,也有这样三个层次的知识结构。

在钱学森建立的系统科学体系中,这三个层次的知识是:

一是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,但和其它工程技术不同,它是组织管理系统的技术,是对所有系统都适用的技术。

二是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。

三是处在基础科学层次上,揭示系统客观规律的

便是系统学和复杂巨系统学。

这个体系的建立对系统科学和系统工程的发展和具有极其重要的意义。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,钱学森还提出了系统论。系统论介于哲学和科学之间,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;另一方面,系统科学的发展经系统论的提炼和概括,又丰富和发展了辩证唯物主义哲学。

对于系统论,钱学森明确指出:“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。”

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,它体现的是系统思维。整体论和还原论都有各自的长处,但也有各自的不足。在认识和改造世界过程中,要用整体论,但仅靠整体论还不行;要用还原论,但仅靠还原论也不行。系统论则把这两者的优势综合集成起来又弥补了各自的不足,既超越了还原论,又发展了整体论,这正是系统论的优势所在。

运用系统论去研究和认知系统,揭示系统客观规律并建立系统的知识体系,就是系统认识论。从这个角度来看,系统科学体系的建立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,系统论、系统科学体系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,它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。

系统科学思想是对辩证唯物主义系统思想的重要发展和丰富。

## 二、复杂巨系统和系统方法论

在系统科学体系中,系统工程已应用到实践中并取得显著成就,如航天系统工程。技术科学层次上的运筹学、控制论、信息论等也有了各自的理论和方

法,并在继续发展之中。但系统学和复杂巨系统学却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年多时间里,钱老参加了讨论班的全部学术活动。后来又以“小讨论班”的方式继续指导系统学的研究。

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。

在讨论班的基础上,钱学森明确界定,系统学是研究系统结构与功能,包括系统演化、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)为主线的系统学的学科体系,构成了系统学的主要研究内容,提出了系统学研究的方法论和方法,奠定了系统学研究基础,指明了系统学研究的方向。

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,即自组织理论,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,需要新的方法论和方法。所以,关于复杂系统、复杂巨系统和社会系统的研究,又称作复杂巨系统学。对于复杂系统、复杂巨系统和社会系统研究,首先要解决的是方法论和方法问题。

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、生命科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,是在还原论指引下的科学革命。

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。这些事实又使科学家们认识到“还原论不足之处正日益明显”(1999年, *Science* 杂志)。

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性问题,又是它不足的一面。所以只着眼于部分,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”(emergence)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”。这里所说的把宏观和微观结合起来,就是要研究微观如何涌现出宏观,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。如果真正实现了这一点,这将在系统论指引下的科学革命。

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、复杂巨系统和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。

更早意识到这一点的科学家是贝塔朗非,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,他于20世纪40年代提出了一般系统论,实质上是整体论,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,论来论去解决不了根本性问题。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”。但认识到了还原论的局限性并能提出整体论,确是对现代科学技术发展的重要贡献。

20世纪80年代中,国外出现了复杂性研究。关于复杂性问题,钱学森明确指出:“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”。

系统整体性,特别是复杂系统、复杂巨系统和社会系统的整体性问题,都是复杂性问题。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”(1999年, *Science* 杂志)。这就使他们的复杂性研究也走向了系统研究。

国外关于复杂性和复杂系统的研究,在研究方法上确实有一些创新之处,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。

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,在方法论指引下是具体方法问题。如果方法论不适合,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,钱学森提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。这就是把系统整体和组成部分辩证统一起来,研究和解决系统问题的系统方法论。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和系统工程的发展,同时也必将对自然科学、社会科学等其它科学技术领域产生深刻的影响。

钱学森不仅提出了系统方法论,同时还提出了运

用系统方法论的具体方法体系和应用方式。

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”(Hall for Work Shop of Metasynthetic Engineering),以下将两者合称为综合集成方法,并将应用这套方法的集体称为总体设计部。这就在系统方法论指引下,形成了一套可以操作且行之有效的方法体系和应用方式。

钱老指出,研讨厅体系是把下列成功的经验和科技成果集成起来的研究平台:

- 一是几十年来学术讨论会(seminar)的经验;
- 二是从定性到定量综合集成方法;
- 三是 $c^3I$ 及作战模拟;
- 四是情报信息技术;
- 五是人工智能;
- 六是灵镜(virtual reality)技术;
- 七是人·机结合的智能系统;
- 八是系统学;
- 九是信息革命中的其它信息技术,如网络技术等。

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方法,也是人·机结合、人·网结合以人为主的从定性到定量综合集成技术。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、资料和信息统统集成起来,从多方面的定性认识上升到定量认识。

钱老提出的人·机结合以人为主的系统思维方式是综合集成方法的理论基础和技术基础。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”。

从这个角度来看,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,善于信息的快速和精确处理。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,以及现在人工智能的发展。

但在形象思维方面,现在的计算机还不能给予我们很大的帮助,远不如人脑的形象思维,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,思维能力也就更强,人将变得更加聪明,它的智能和智慧与创造性比人脑要高,比机器就更高,这也是 $1+1>2$ 的系统原理,它体现的是系统思维方式,见图4。

从图4可以看出,人·机结合以人为主的思维方式,它的智能、智慧和创造能力处在最高端。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、人·网结合的新人类,也是人·机结合、人·网结合“新社会”中的新人类,这个趋势已经出现并在继续发展之中。我们要高度重视这个“新人类”和“新社会”的研究。

信息、知识和智慧是三个不同层次的问题。信息有广度、知识有深度、智慧有高度。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信息、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、人·网结合以人为主的方式来获得信息、知识和智慧,而且比人脑还有优势,这是人类发展史上具有里程碑意义的进步,我们

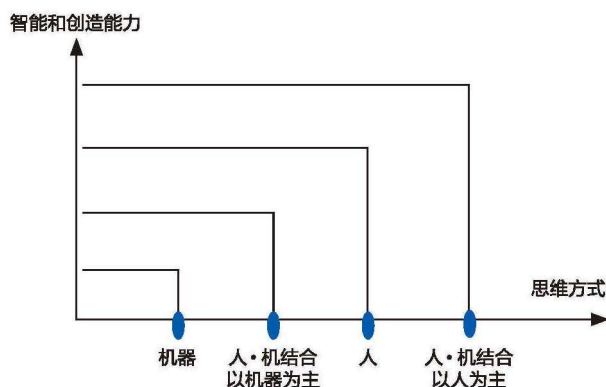


图4 智能和创造能力与思维方式的关系

要高度重视和研究这一发展趋势。

综合集成方法就是这种人·机结合、人·网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，以集大成得智慧，所以钱老又把这套方法称为“大成智慧工程”(Metasynthetic Engineering)，将大成智慧工程及其应用进一步发展，在理论上提炼成一门学问就是“大成智慧学”。

综合集成方法既可以用于理论研究，也可以用于应用研究。

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，按照系统方法论，总体设计部运用综合集成方法对其进行研究。

首先是定性综合集成，这是在已有相关的科学理论、经验知识和信息的基础上与专家判断力（专家的知识、智慧和创造力）相结合，对所研究的系统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，它之所以是经验性假设，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，也就是精密科学的研究方法。

对于复杂系统、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，对所研究的系统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。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科学中所用的各种方法就显得力所不及了，如社会系统、地理系统中的一些问题，既不是单纯的逻辑推理，又不能进行实验。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。

系统科学要成为“精密科学”，它的出路在哪里？这个出路就是人·机结合、人·网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，充分发挥计算机在逻辑思维方面的优势。

在定性综合集成的基础上，通过人·机结合以人为主，再进行定性定量相结合综合集成。这里既有专家群体的智慧，也包括了不同学科、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，最终实现从定性到定量综合集成，获得系统的精确定量认识，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，也就是总体设计部的研究方式和工作方式。

概括起来说，就是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的，而是循环往复逐次逼近的。

复杂系统、复杂巨系统和社会系统问题，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5是综合集成方法用于决策支持问题研究的示意图。

这套方法是目前处理复杂系统、复杂巨系统和社会系统的有效方法，已有很多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，实践基础是系统工程实践，哲学基础是辩证唯物主义认识论和实践论。

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



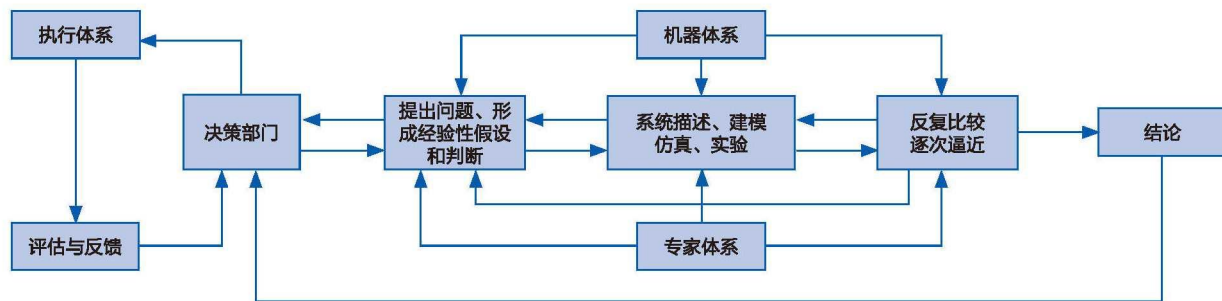


图5 智能和创造能力与思维方式的关系

要影响，从而推动了系统科学的整体发展。

20世纪90年代中，钱学森提出开创复杂巨系统的科学与技术。

由于有了系统方法论和综合集成方法，便可以进行复杂巨系统的理论研究和应用研究。

在科学层次上建立和发展复杂巨系统理论，就是综合集成的系统理论，它属于复杂巨系统学的内容。现在这个一般理论尚未完全形成，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，是对所有系统都适用的技术。它的应用首先是从工程系统开始的，称作工程系统工程，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，处理工程系统的方法就暴露出了它的局限性，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阶段，是现在就可以应用的，用来组织管理复杂巨系统和社会系统的系统工程技术和方法。

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，它是把整体和部分协调统一起来、从整体上研究和解决问题的整体性技术、综合集成的系统技术，也是整体优化的定量技术。它是从整体上研究和解决系统管理问题的技术和方法。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”。这场技术革命必将引起组织管理革命。

钱学森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（基础理论和应用理论）、综合集成技术和综合集成工程所构成的综合集成体系，这就形成了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推进了，发展到了复杂巨系统科学体系。

从现代科学技术发展呈现出既高度分化又高度综合的两种趋势来看，前者是以还原论为主发展起来的科学和技术，后者则是以系统论为主发展起来的科学和技术。系统科学和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，是在这个发展趋势上出现的科学革命和技术革命，从而成为21世纪一个新兴的科学技术体系。（未完待续）

## 作者简介

### 于景元

博士生导师，曾担任北京信息与控制研究所副所长，中国系统工程学会副理事长，中国社会经济系统分析研究会副理事长。中国航天