

钱学森对系统科学和系统工程的贡献

于景元 涂元季

2001年12月11日是钱学森同志九十寿辰。

在钱老辉煌的科学生涯中,他的研究领域有应用力学、喷气推进与航天技术、工程控制论、物理力学、系统工程、系统科学、思维科学、人体科学、科学技术体系与马克思主义哲学等,跨越了工程技术、技术科学、基础科学直到哲学四个层次。他不仅在这些领域中建树了许多丰碑,而且充分体现了他的理论与实践紧密结合、科学技术与马克思主义哲学紧密结合的研究特色与学术风格。他所取得的成就充分表明:“钱学森是一位杰出的科学家、思想家,他把科学理论与火热的改造客观世界的革命精神结合起来。一方面是精深的理论,一方面是火热的斗争,是‘冷’与‘热’的结合,是理论与实践的结合。这里没有胆小鬼的藏身处,也没有自私者的藏身地,这里需要的是真才实学和献身精神。”钱学森的科学精神、科学思想、科学方法是中华民族宝贵的精神财富,永远值得我们学习。

在钱老丰富的科学历程中,有一个非常突出的明显特点,那就是他的系统思维和系统思想。20世纪70年代末以来的20多年时间,是钱学森系统思维、系统思想非常活跃的时期。他一方面面向社会实践的应用,另一方面追求理论与方法的创新,他的系统思想、系统方法、系统理论与系统应用,都有了新的发展,进入了新的阶级,达到了新的高度。

钱学森的系统思想,首先表现在他提出了一个清晰的现代科学技术体系结构;同时又进一步建立了系统科学体系结构,即系统科学如同自然科学、社会科学等一样,是现代科学技术体系中的一个科学技术部门。它也有三个层次的知识结构:处在工程技术层次上的是系统工程,这是直接用来改造客观世界的学问;处在技术科学层次上的有运筹学、控制论、信息论等,这是直接为系统工程提供理论方法的;而处在基础科学层次上的便是系统学。这是一门尚待建立的新兴学科,它是钱老在1979年首先提出来的。

钱老在美国创建了工程控制论,回国后又大力推动运筹学的研究。如果说这是他早期对系统理论贡献的话,那么创建系统学则是他对系统理论的新贡献。与此同时,在系统应用方面,他又将系统工程推进到复杂巨系统工程。这两方面的成就都是具有里程碑意义的工作。本文的目的,就是介绍上述两个方面钱老所做出的贡献。

一、创建系统学

为了建立系统学,钱学森采取了讨论班的方式。他亲自倡议和指导了“系统学讨论班”的学术活动。在讨论班上,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、知识工程、中医学、西医学、分子生物学、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、军事科学等的新进展,以及来自实践的成功研究案例,进行学术报告和讨论,充分发扬学术民主。在这个讨论班上,钱老发表了很多重要学术思想,提炼了许多重要科学概念,提出了系统集成方法论。在这些进展的基础上,钱老明确界定系统学是研究系统结构与功能(演化、协同与控制)一般规律的科学。

系统分类是系统学中的一个基本问题。已有的系统分类主要依据系统的内涵,其缺点是失去了对系统本质的刻画。钱老根据系统的结构及其复杂程度,提出了新的系统分类。这里,一个是子系统的数量和种类,另一个是子系统之间关联关系的复杂程度和系统的层次结构。从这个角度出发,将系统分为简单系统、简单巨系统、复杂巨系统。例如生物系统、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。其中社会系统因有人作为子系统参与其中,而人又是有思维的,是最复杂的巨系统了,所以又称作特殊复杂巨系统。这些系统又都是开放的,与外界有物质、能量和信息的交换,故称作开放的复杂巨系统。

钱老的系统分类具有极为重要的理论和实践意义。近 10 多年来,复杂性研究引起了国内外一些专家、学者的重视,但至今不同学科的专家、学者对复杂性的认识还不一致。在 1999 年出版的美国《科学》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,“以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”。这说明他们也意识到要把复杂性研究和系统概念结合起来。但在复杂性问题上,钱老和外国科学家不同,他不是从复杂性抽象定义出发,而是从实际出发,从方法论角度来区分复杂性和简单性。如果仅从概念出发,不仅难以统一认识,甚至抓不住事物本质而把复杂性简单化,或把简单性复杂化了。在国外,有人把一个层次的问题如混沌,即使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,都叫复杂性问题。但钱老认为,这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 80 年代就明确指出“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,都是复杂性问题,复杂巨系统就是这类问题”。他还进一步指出,国外的复杂性研究实际上是开放的复杂巨系统的动力学问题。这样,就从系统学角度给出了复杂性的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、简单巨系统都已有了相应的研究方法和方法论,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),不是还原论方法或已有的其他方法所能处理的,需要有了新的方法和方法论。从这个意义说,它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。比较早意识到这一点的科学家是冯·贝塔朗菲(L. von Bertalanffy)。他是一位理论生物学家,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,于是他转向了整体论,提出了一般系统论。一般系统论对系统科学的产生和发展作

出了重要贡献,但限于当时的科学技术水平,他没能解决整体论方法的具体问题。

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。他在吸收国外现代科学技术进展的同时,又能不受他们理论方法的局限,站得比外国科学家更高一些。他在实践论的指导下,不断总结、提炼一些成功的实践经验。80年代初,针对军事对阵系统和现代作战模拟的研究,他曾提出处理复杂行为系统的定量方法学是科学理论、经验和专家判断力的结合。这种方法还是半经验半理论的。后来在“系统学讨论班”上,他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,为新方法的形成奠定了实践基础。

尤其需要强调的是,对当前这场以计算机、网络、通信为核心的信息技术革命,钱老不仅指出了它将导致一场新的产业革命,而且对人类自身,特别对人的思维也会产生重要影响,将出现人机结合的思维方式,人将变得更加聪明,从而推动了思维科学的发展,也为研究方法的发展开辟了新的途径。

20世纪80年代末,钱老提出了“从定性到定量综合集成方法”以及它的进一步发展:“从定性到定量综合集成研讨厅体系”(以上简称综合集成方法论),并把运用这套方法的集体称为总体设计部。

综合集成方法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、人与网络结合的体系。它的成功应用就在于发挥这个体系的综合优势、智能优势和整体优势。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。

在应用这个方法时,也需要系统分解,在分解后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。综合集成方法吸收了还原论方法和整体论方法的长处,同时也弥补了各自的局限性,它采取了自上而下,同时又自下而上的研究途径,是还原论方法和整体论方法的结合,既超越了还原论方法,又发展了整体论方法。综合集成方法论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中心的现代信息技术,实践基础是复杂系统工程的实际应用案例,哲学基础是马克思主义哲学的实践论和认识论。

国外的复杂性研究,在具体研究方法上确有一些创新,如遗传算法、Swarm平台、以Agent为基础的系统建模等,但在方法论上,虽然也认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,因而曾感到困惑。而钱老的综合集成方法论则是方法论上的创新,这也是钱老比他们高明之处。

钱老指出,开放的复杂巨系统研究,目前还没有形成从微观到宏观的理论,也没有从子系统相互作用构筑起来的统计力学。但有了研究方法和方法论,就可以逐步建立其理论。他还进一步指出,要建立开放的复杂巨系统一般理论,必须从具体的复杂巨系统研究入手。只有这样,研究成果多了,才能从中提炼出一般性理论。

综合以上所述,钱老提出了以简单系统、简单巨系统、复杂巨系统和社会系统为主线

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,其系统理论部分,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,它的重要性并不亚于相对论和量子力学。从现代科学技术发展来看,如果说量子力学是微观层次上(典型尺度约为 10^{-15}cm)研究的科学革命,相对论是宇观层次上(典型尺度约为 10^{21}m)研究的科学革命,那么系统学则是宏观层次上(典型尺度约为 10^2m)研究的科学革命。宏观层次就是我们人类生活的这个客观世界。在这个层次上出现了生命和生物,产生了人类和人类社会。复杂巨系统和复杂性研究,主要都集中在这个层次上。

二、开创复杂巨系统工程

钱学森在系统理论上的成就,是以他长期的系统工程实践为基础的。在开创和发展我国导弹和航天事业的过程中,钱老不仅成功地运用了工程系统工程,而且又提炼成一般系统工程。1978年,他和许国志、王寿云在《文汇报》上发表的《组织管理的技术——系统工程》一文就明确指出:“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”。这篇文章对系统工程在我国的推广和应用,起到了很大作用。从那以后,系统工程的应用范围越来越广泛,所处理的系统也越来越复杂。但是,对于社会系统、地理系统等这类复杂巨系统,不是一般系统工程所能处理的,就连运筹学、控制论、信息论等这些技术科学所提供的理论方法也不够用了。在大力推动系统工程应用的同时,钱老一直高度重视系统工程方法的探索和研究。随着系统学的进展,特别是综合集成方法论的提出,为复杂巨系统的组织管理提供了有效的科学方法,这就开创了复杂巨系统工程,特别是社会系统工程,这是钱老对系统工程的又一重大贡献。

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,首先提出了社会主义建设的体系结构。社会形态是马克思提出来的。钱老把社会形态和社会系统结构结合起来,认为尽管社会系统很复杂,“但从宏观角度看,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。”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文明建设的系统结构: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(文件中通常称作民主与法制建设),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、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。综合起来共四大领

域九个方面,在这九个方面中,科技经济建设是中心,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。一个社会与其所处地理环境密切相关,社会系统的环境就是地理系统,社会系统和地理系统之间也是相互联系、相互影响、相互作用的。从系统学观点来看,只有当社会系统内部之间以及与其环境相互协调时,才能获得最好的整体功能。这就是说,社会主义三个文明建设以及地理建设,必须协调发展,形成良性循环,才能使我国社会主义建设速度更快、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。在我国社会主义建设过程中,已有大量事实证明了这一点。

四大领域的建设是变革和建设社会与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,是改造客观世界的工程,那就不仅需要理论,而且还需要技术。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”。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,以使四大领域协调发展并获得长期和最好的整体效益的工程技术。它所用的方法就是综合集成方法和总体设计部。

我国的改革开放和社会主义现代化建设,迫切需要社会系统工程,它对决策科学化、民主化和组织管理现代化具有重要意义。这也就是为什么钱老一直大力推动系统工程的应用和建议设立总体设计部的根本原因。他的这些建议受到党和政府的高度重视和充分肯定。

钱学森是我国系统工程和系统科学事业的开拓者和奠基者。他在这一领域中所取得的成就,是钱学森科学精神、科学思想、科学方法的重要组成部分。而在这个领域的开创过程中,他所表现出来的勤奋的治学精神、严谨的治学态度、求实的治学作风,永远是我们学习的光辉榜样。

参 考 文 献

- 1 王寿云,等. 中国现代科学家传记钱学森. 北京:科学出版社,1991
- 2 钱学森. 现代科学技术的特点和体系结构. 论系统工程. 长沙:湖南科学技术出版社,1988
- 3 钱学森. 大力发展系统工程尽早建立系统科学体系. 光明日报. 1979-11-10
- 4 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志. 1990(1)
- 5 Gallagher R, Appenzeller T. 超越还原论. 见:戴汝为主编. 复杂性研究论文. 1999
- 6 王寿云,等. 开放的复杂巨系统. 杭州:浙江科学技术出版社,1996
- 7 Horgan J. 复杂性研究的发展趋势——从复杂性到困惑. 科学美国人,1995(10)

- 8 许国志主编. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社,2000
- 9 钱学森,许国志,王寿云. 组织管理的技术——系统工程. 文汇报, 1979-9-27
- 10 钱学森,涂元季. 我国社会主义建设的系统结构. 人民论坛,1992(6)
- 11 钱学森. 社会主义文明的协调发展需要社会主义政治文明建设. 中共中央党校报告选(1~11), 1989
- 12 钱学森,乌家培. 组织管理社会主义建设的技术——社会工程. 论系统工程. 长沙:湖南科学技术出版社,1988年
- 13 钱学森. 我们要用现代科学技术建设有中国特色的社会主义. 九十年代科技发展与中国现代化系列讲座. 长沙:湖南科学技术出版社,1992

作者简介:于景元 1937年出生。现为中国航天科技集团公司710所研究员、科技委主任、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审组成员。

涂元季 1939年出生。现为中国人民解放军总装备部高级工程师,钱学森的助手。