

# 系统科学革命和系统工程技术革命

于景元

( 航空航天部 710 所 100037 )

本世纪内,科学技术有了迅速发展,某些传统学科不断取得重大突破,同时又相继产生了一些新兴学科。所有这些进展都大大加深了我们对客观世界的认识,同时也极大地提高了我们改造世界的能力,充分显示出科学技术是第一生产力。在这些进展中,系统科学的产生和发展尤其值得高度重视。我国系统科学界的前辈钱学森、许国志同志曾指出:系统科学是本世纪中叶兴起的一场科学革命<sup>(1)</sup>。科学革命是人类认识世界的飞跃,技术革命是人类改造世界的飞跃,如何认识系统科学所引起的这场科学革命,以及系统工程所引起的技术革命,这对系统科学的发展是很重要的问题。

系统科学实际上是一门科学技术体系。按照钱学森同志的划分<sup>(2)</sup>,这个体系由三个层次构成:处在工程技术层次上的是系统工程,处在技术科学层次上的有控制论、信息论、运筹学等;而处在基础科学层次上的则是系统学(Systematology),它是研究系统结构与功能一般规律(包括演化、协同和控制)的学科,正处在形成之中。沟通系统科学与哲学之间的桥梁是系统论,它属于哲学层次。由此可见,系统科学是由多个学科构成的,但有一点是共同的,那就是不管处在哪个层次上,它们研究和应用的对象都是系统。

系统在自然界和人类社会中(包括人自身)是普遍存在的。太阳系、人体、家庭、企业、国家等都是系统。科学家们为了研究上的方便,按照不同原则将系统划分为不同的类型。例如:自然系统和人造系统、开放系统和封闭系统、动态系统和静态系统、生命系统和非生命系统等等。这样划分的着眼点是放在系统具体内涵上,比较直观。但往往却掩盖了系统本质。钱学森同志基于系统复杂性的特点,将系统划分为简单系统、简单巨系统和复杂巨系统。复杂巨系统的重要特征是有层次结构,如生物体系统、人体系统、人脑系统、地理系统(包括生态系统)、社会系统、星系系统等。其中社会系统是以有意识活动的人作为子系统的,这是最复杂的系统了,所以又称作特殊的复杂巨系统。以上这些系统都是开放的,所以也称作开放的复杂巨系统<sup>(3)</sup>。

可以看出,以上列举的开放的复杂巨系统,涉及到生物学、医学、思维科学、地学、社会科学和天文学。这些领域的理论本来分布在不同的学科甚至不同的科学技术部门,而且均已有了较长的历史,但现在却能概括在开放的复杂巨系统这一概念之中。过去在这些学科中,也或多或少的用过本学科各自语言涉及到开放的复杂巨系统这一思想,但现在却更加清晰和更加深刻了。这个事实告诉我们,开放的复杂巨系统概念的提出及其理论研究,不仅将推动上述这些学科的发展,而且还为这些理论的沟通开辟了新的途径。

著名物理学家普朗克认为:“科学是内在的整体,它被分解为单独整体不是取决于事物本身,而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学,通过生物学和人

类学到社会学的连续的链条,这是任何一处都不能被打断的链条”<sup>〔4〕</sup>。从这个观点来看,以往的自然科学和社会科学研究,只是覆盖了这根链条,并没有联接起来研究。直到系统科学的出现,通过简单系统、简单巨系统、复杂巨系统的研究,则形成了把这根链条联结起来进行研究的科学。在科学发展过程中,这是具有重大意义的转折。

在科学发展史上,长期以来,不同领域的科学家们早已注意到,在生命系统和非生命系统之间表现出似乎截然不同的规律。非生命系统通常服从于热力学第二定律,系统自发地从有序变到无序,而无序却不会自发地变到有序。但是生命系统却刚好相反,生物进化、社会发展总是由简单到复杂、由低级向高级越来越有序,能自发地形成有序的稳定结构。两类系统之间的这种矛盾现象,长时间得不到理论解释,致使有些科学家认为,两类系统各有各的规律,互不相干。直到本世纪 70 年代,耗散结构理论和协同学的出现,为这个问题的解决提供了一个科学的理论框架。这个理论认为:热力学第二定律所揭示的是孤立系统(与环境没有物质和能量的交换)在平衡态和近平衡态(线性非平衡态)条件下的规律。但生命系统通常都是开放系统并且远离平衡态(非线性非平衡态),在这种情况下,系统通过与环境进行物质、能量、信息的交换引进负熵流,在达到一定条件时,系统就能从原来的无序状态自发地转变为在时间、空间和功能上的有序状态,产生一种新的稳定的有序结构,Prigogine 称作耗散结构。Haken 则更进一步指出,一个系统从无序转变为有序的关键并不在于系统是平衡和非平衡,也不在于离平衡态有多远,而是由组成系统的各子系统,在一定条件下,通过它们之间的非线性作用,相互协调与合作自发产生稳定的有序结构,这就是自组织结构。这样,在不违背热力学第二定律的条件下,上述理论沟通了两类系统的内在联系,指出了两类系统之间并没有真正严格的界限,表现上的鸿沟,是由相同的系统规律所支配。现代科学的这一成就正是通过系统规律把过去断开的链条开始联结起来进行研究了。虽然是在简单巨系统层次上进行的,但其意义是重大的。

以上三种不同类型的系统,还意味着有不同的研究方法。对于简单系统,可以从子系统相互作用出发,直接综合成全系统的运动功能,这是直接方法。必要时,还可以借助于大型计算机或巨型计算机。对于简单巨系统,因为子系统数量非常多,如激光系统,应用简单系统的直接方法不行了,就连巨型计算机也不够用了。直接综合方法不行,人们就想到本世纪初统计力学的巨大成就,把亿万个分子组成的巨系统的功能略去其细节,用统计方法概括起来,这很成功,创立了自组织理论。这就是前边提到的 Prigogine 和 Haken 的贡献。

那么,研究开放的复杂巨系统(包括社会系统)的方法论是什么呢?自组织理论的成功,使得像 Haken 这样的科学家也过份乐观起来,以为这些基于还原论的定量方法也可以应用到开放的复杂巨系统中,结果是不断遇到困难。对于开放的复杂巨系统,由于存在层次结构,仅靠还原论方法解决不了这类问题(对于一个层次的系统,还原论方法是能用的)。还原论方法是把事物分割开来进行研究,然后再拼凑起来,以为低层次和局部问题弄清楚了,高层次和整体问题也就自然清楚了。但系统科学理论表明:高层次事物可以具有低层次事物所没有的性质,或者说整体可以具有其部分所没有的性质,也就是通常所说的一加一可以大于二。还原论方法可以解决一加一等于二的问题,如线性系统中的叠加原理,但解决不了一加一大于二的问题如非线性问题。开放的复杂巨系统的研究正是属于这类问题。在这种情况下,就需要有新的方法论来研究这些问题。否则,把复杂性问题简单

化,或用研究简单性问题的方法(如还原论方法)去研究复杂巨系统问题,其结果是注定不能成功的。近些年来,国外出现了所谓复杂性研究,美国 Santa Fe Institute 更提出了复杂性科学。这是因为他们在实践中遇到了复杂性困难,明白了还原论方法已行不通,但始终不见他们解决复杂性问题的方法。一般系统论的创始人彼塔朗菲是觉悟比较早的一位科学家,他本人是理论生物家,当生物学的研究已进入到分子层次,产生了分子生物学时,用彼塔朗菲本人的话来说,他对生物体的整体认识反而模糊了,于是他意识到在分解还原的同时,还应进行整体研究,这样的认识使他转到了系统论,提出了系统方法,但系统方法到底是什么,他并没有给出明确的具体答案。

在我国,由钱学森同志直接指导的“系统学讨论班”,从 1986 年开始对前述各类开放的复杂巨系统研究的最新进展进行了研究和探索,特别是在对社会系统、人体系统、地理系统、军事系统研究的提炼、概括和抽象的基础上,于 1989 年,钱学森同志提出了研究开放的复杂巨系统的方法论,这就是“从定性到定量综合集成方法”(以下简称综合集成方法)。这个方法的实质是专家体系、统计数据和信息资料、计算机技术三者有机结合,构成一个高度智能化的人机结合系统,它具有综合集成各种知识(感性的、理性的、经验的、科学的、定性的、定量的),实现从定性到定理认识的功能。这个方法成功的应用,就在于发挥这个系统的智能优势整体优势和综合集成优势。按照我国传统说法,把一个复杂事物的各个方面综合起来,获得对整体的认识,称之为“集大成”,所以又可以把这个方法称之为“大成智慧工程”(Metasythetic Engineering)它具有以下几个特点:

(1) 把定性研究和定量研究有机结合起来,并贯穿全过程,从多方面定性认识,上升到定量认识;

(2) 把科学理论和经验知识结合起来;

(3) 根据系统思想,把多种学科结合起来进行综合研究,实现  $1+1>2$  的综合集成,而不是  $1+1=2$  的“拼盘”;

(4) 根据复杂巨系统的层次结构,把宏观研究和微观研究统一起来;

(5) 应用这个方法必须有计算机系统的支持,这个计算机系统不仅具有管理信息系统(MIS),决策支持系统(DSS)的功能,更重要的是具有综合集成的功能,这就要用到知识工程、人工智能、信息技术等高新技术;

(6) 这个方法要求专家按群体方式工作,充分发挥辩证思维和社会思维的作用,改变了传统科学研究中的个体工作方式。

综上所述,还可以看出:

(1) 这个方法保持和发扬了自然科学定量研究方法论的长处,也弥补了社会科学定量研究的不足,从而使社会科学从现在的“描述科学”逐步走向定量科学;

(2) 避免了还原论方法的缺陷。综合集成方法也要求系统分解,但这是在系统总体指导下的分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到系统总体,实现  $1+1>2$  的飞跃;

(3) 这个方法也不同于一般系统论方法。一般系统论方法强调系统整体是对的,但只是泛泛而论,解决不了问题,而综合集成方法则是按一定科学方式和程序可以进行操作的,是能解决问题的,综合集成方法是集成了整体论和还原论的优点而形成的方法论。

(4) 这个方法在哲学上是符合马克思主义认识论的。

1992 年,钱学森同志又提出“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的思想,这是把下

列成功的经验汇总了<sup>[5]</sup>。

1. 几十年来世界学术讨论的 Seminar 经验;
2. 从定性到定量综合集成方法;
3. C<sup>3</sup>/I 及作战模拟;
4. 情报信息技术;
5. “第五次产业革命”;
6. 人工智能;
7. 临镜(Virtual reality)
8. 人机结合智能系统;
9. 系统学。

这个研讨厅体系就其实质而言,是综合集成了以计算机为核心的现代高新技术成果,与专家体系一起构成的高度智能化的人—机结合系统。它由三个体系构成:知识体系、专家体系、机器体系(以计算机为核心的高新技术成果构成的)。专家体系、机器体系是知识体系的载体。这个研讨厅体系不仅具有知识的采集、存储、传递、共享、调用、分析和综合等功能,更重要的是具有产生新知识的功能,是知识的生产系统,既可用于研究理论问题,也可用来解决实践问题<sup>[6]</sup>。

通过上述可以看出,综合集成方法以及研讨厅体系是从整体上研究和解决问题的方法论,是认识方法论上的一次飞跃,使人类认识世界的能力登上了一个新台阶。

开放的复杂巨系统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出发构筑出来的统计力学。但有了上述方法论,我们就可以逐步建立起开放的复杂巨系统理论。一旦这个理论建立起来,必将大大推动科学技术的飞速发展,引起一场新的科学革命,这场科学革命将比以往任何一次科学革命都要深刻,对人类文明的贡献也将更大。

从控制论科学的发展也能给我们一些启示。大家知道,维纳提出控制论后,相继出现了工程控制论、生物控制论、经济控制论、社会控制论以及现代控制理论。在这些控制论分支中,工程控制论有了实质性的发展,有方法、有理论,对指导工程实践发挥了重要作用。其中所建立起来的理论方向,也成为现代控制理论的主要方向。现代控制理论近二、三十年也有了很大发展。它主要是基于系统数学模型而发展起来的,对于揭示系统内在规律和控制规律具有重要意义。只要有了系统的数学模型,这些理论都能得到应用,从这个意义上讲具有应用的广泛性。但若系统还没有数学模型描述时,这些理论的应用也受到了局限,这样,系统建模就成为一个首要问题。相比之下,生物控制论、经济控制论、社会控制论没有取得象工程控制论、现代控制理论那样大的进展,原因在哪里呢?现在看来,生物控制论、经济控制论、社会控制论的研究对象都是复杂巨系统,认识和控制这类系统需要有新的方法论。现在有了研究这类系统的方法论,就有可能去建立复杂巨系统控制论,这就将从根本上推动生物控制论、经济控制论、社会控制论的发展,实际上是系统学对控制论的推动作用。

近些年来,国外在研究混沌的控制问题<sup>[8]</sup>。大家知道自 60 年代初美国科学家洛伦兹发现混沌现象以来,引起了国内外科学界的广泛重视,国内物理学界、数学界、生物学界、经济学界以及系统科学界等,都有一些专家、学者从事这方面的研究,甚至哲学界的一些学者对此也表现出很大兴趣。从系统科学来看,简单系统、简单巨系统、复杂巨系统

都有可能出现混沌，特别是复杂巨系统，由于有层次结构，其中的混沌问题更是值得认真研究。所以，混沌的研究和控制是系统科学中的重要内容。正如钱学森同志指出的，混沌学也属系统科学。

混沌理论被认为是继相对论、量子力学之后，发生的一次新的科学革命，目前正在形成和发展之中。混沌现象发生在非线性系统，是分数维的奇怪吸引子，是状态空间中的有限区域。内部具有自相似的嵌套结构，不是混沌无序的。混沌是看来非决定性的决定性，这一点对认识混沌是很重要的。对于复杂巨系统，钱学森同志曾指出，宏观的序的形成是靠微观的频繁变动为基础的，即宏观有序是建立在微观的混沌之上的。

在研究混沌的同时，科学家们也在探索混沌的控制问题<sup>〔8〕</sup>。目的是根据实际的需要，从各类非线性系统所产生的混沌运动中，选择出所需要的各种周期运动、非周期运动并实现对其稳定控制，目前已有了一些控制方法并得到了实现，当然，这方面研究仅仅是个开始，但人们已看到它的巨大潜力。据报导，日本有的公司已开发出新的功能元件，作为大容量动态信息存储器及高速数据处理系统，这里就是用了时间—空间混沌的控制。另外，混沌编码技术和解码技术已用到军事系统中。还有人提出应用混沌同步原理可开发混沌计算机，这是新一代的计算机。总之，有人预计混沌控制及其应用，在今后高新技术领域中将起重要作用。

混沌理论和应用是十分引人注目的研究方向，它所揭示的事物性质和规律，都是系统的性质和规律，混沌理论和应用的发展，必将推动系统科学的发展，从而推动整个科学技术的发展。

系统科学不仅引起一场科学革命，同时还引起了一场技术革命。技术革命是人类改造世界的飞跃，在系统科学体系中，系统工程就是直接用来改造世界的工程技术。它的出现已经并将继续显示出在推动人类社会进步，以及促进人与自然协调发展上的重要作用。

人类是通过社会实践来改造世界的。社会实践是人们有目的、有组织的活动，也就是人类社会系统的物质活动，所以社会实践本身也是个系统问题，是有人参与的多种形式、多种层次的复杂复质系统。随着科学技术的发展，生产力的提高和社会的进步，社会实践越来越丰富，它突出地表现在空间活动范围上越来越大，时间尺度变化上越来越快，层次结构上越来越复杂，效果和影响上越来越广泛和深远。在这种情况下，社会实践决不是想干什么就干什么，想怎么干就怎么干，它应该在人类整个知识体系的指导下去实践，才有可能获得成功。

现代的社会实践具有很强的综合性、复杂性和动态性。它不容许我们孤立地和静止地处理。例如：长期以来，人类对自然界是采取征服和索取的态度，以至严重到向大自然“宣战”的地步。但科学理论和实践的发展，终于使人们明白了，人类与自然之间应该是协调发展关系，不是一味索取只顾今天不管明天和后天，否则人类的生存都将受到威胁，更谈不上不发展了。正是这个原因，1992年在巴西召开的联合国环境与发展大会上，提出了实现全球持续发展的行动纲领，得到了与会各国的大力支持。基于持续发展的概念，发展现代社会生产力不仅要提高生产物质财富的能力，同时还要包括加强和环境协调发展的能力，由此可见，今天社会生产实践的水平已比过去大大提高了，当然也比过去复杂了。

再以我国三峡工程为例，这项工程涉及到发电、运输、防洪、泥沙、地质、生态环境、人口迁移、文物保护、投资、经济、时间进度等各个方面，而且是跨世纪工程。要解

决上与不上以及怎样上等这样一些重大问题,靠“拍脑袋”是不行的。即使从科学角度来看,也不是哪一门科学技术或某个科学技术部门所能胜任的。在方式上也不是仅靠有关领域专家座谈会和咨询一下就能解决的。

实践作为一个过程,包括实践前形成的思想、设想、规划、计划、方案、可行性等,都应进行科学论证,以使实践目的性建立在科学基础上,而不是建立在经验基础上,更不能建立在感情和意志的基础上;也包括在实践过程中,要有科学的组织管理和协调,以保证实践的有效性(效率和效益);还包括实践后的评估和总结,检验实践的科学性和合理性,以便发现新问题,发展新理论。所有这些都需要利用已有的科学理论和技术去研究和解决,而且还要处理有可能至今我们尚未遇到和认识的新问题。例如: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,就有许多我们从未遇到过的新问题,这样的实践就更加复杂和困难,因而也就更需要研究和探索。

在社会实践比较简单的情况下,上述问题并不显得突出和严重,但面对现代社会实践的复杂性、综合性、动态性以及实践过程中的科学性、合理性和有效性问题,如何组织协调和管理好社会实践活动,以取得实践的成功,就成为一个十分突出和迫切的问题了。从实践论观点来看,社会实践应在社会认识指导下进行,人类的社会认识仅就知识形态来说,就已经形成了十分丰富的知识体系。这是人类认识世界所积累的宝贵财富,也为指导社会实践提供了坚实的理论和科技基础。这个知识体系由三个层次构成:直接通过实践所获得的是经验知识,它的特点是只知其然不知其所以然,所以进入不了科学知识范畴,但其中也有许多对我们有用的东西,值得我们珍惜;往上一个层次就是科学知识,这类知识的特点是不仅知道是什么,还知道为什么。科学知识发展到今天,已构成一个庞大的科学技术体系,除了通常的自然科学和社会科学外,还有其它科学技术部门<sup>[6]</sup>;再往上一个层次就是哲学知识,特别是马克思主义哲学,它是人类知识的最高概括,是人类智慧的结晶。

正如前面指出的,社会实践是有人参与的复杂物质系统。现在的问题是,如何综合运用人类知识体系(哲学的、科学的、经验的)去组织、协调和管理好社会实践全过程,以保证实践的成功,并取得最好的效果。实质上,这就是如何组织、管理系统的问题。这门组织、管理系统的技术,就是前面提到的系统工程。系统工程就是组织、管理系统的研究、规划、设计、制造、试验和使用的技术,是贯穿社会实践全过程的技术。这项技术不同于已有的其它技术,它是一项综合性的整体技术。如果说已有的技术在形态上是“硬技术”的话,那么这项技术则是“软技术”。打个比方,如同计算机的硬件和软件,硬件是摸得着看得见的,而软件则是摸不着看不见,但它却像灵魂一样把计算机各个部分组织协调起来运行自如,使计算机具有强大的功能。所以“软技术”并不软,它的价值和意义就在“软”上。

系统工程技术的产生,使人类社会实践由过去那种盲目的、经验性的和被动的状态,转变到现在科学的和主动的状态,大大提高了人类改造世界的能力,并且随着今后社会实践的发展,这项技术的作用必将显得更加重要和突出。近几十年里,系统工程已得到广泛应用,并取得了辉煌成就。美国阿波罗登月的成功,首先宣布的是系统工程的胜利。我国航天事业所取得的成就,也是成功应用系统工程的典范。当前信息技术引起全球范围内的信息革命,也正是和系统工程引起的技术革命有机结合起来,才导致了现在到来的人类历史上第五次产业革命<sup>[7]</sup>。

我国正在进行改革开放和社会主义现代化建设。这是一场极为复杂的社会实践。如何把系统工程应用这个实践中来呢?党中央、国务院一直很重视系统工程的应用。在中央文件和中央领导讲话中,都多次指出,改革开放和社会主义现代化建设是一项庞大的、复杂的社会系统工程。在国内外,这是最明确的把系统工程应用到变革社会的伟大实践中。根据马克思创立的社会形态概念,任何一个社会系统都有三种社会形态:即经济的社会形态、政治的社会形态和意识的社会形态。钱学森同志指出:相应于这三种社会形态应有三种文明建设,即物质文明建设(经济的社会形态)、政治文明建设(政治的社会形态)和精神文明建设(意识的社会形态)。根据系统思想,社会主义文明建设,应是这三种文明建设的协调发展。如再加上社会系统的环境—地理系统建设,即地理建设,那么,我国社会主义建设就包括上述三个文明建设和地理建设,这就是社会主义建设的四大侧面。其中物质文明建设包括经济建设、人民体质建设;政治文明建设包括民主建设、法制建设和政体建设;精神文明建设包括思想建设和文化建设;地理建设包括环境保护和生态建设、基础设施建设,这九个方面是以经济建设为中心的。为了使三个文明建设之间以及与地理建设相互协调发展,以取得社会系统长期的和最好的整体效益,这就需要社会系统工程。

为了实现社会系统工程,钱学森同志多次提出建立国家总体设计部及其体系的建议。总体设计部是实现社会系统工程的实体机构,也是实现综合集成方法所需要的组织形式。它是由多部门、多学科的专家组成。在以计算机为核心的强大机器系统支持下,应用综合集成方法(直到研讨厅体系)和社会系统工程技术,对社会主义建设的四大侧面和九个方面,进行总体分析、总体论证、总体规划、总体设计、总体协调,提出现实可行的具有可操作性的各种配套的方针政策和发展战略,为决策者和决策部门提供科学的决策支持,实现对这场极其复杂社会实践的科学组织和管理,以取得实践的成功。

实际上,总体设计部、社会系统工程、综合集成方法(直至研讨厅体系)紧密结合,形成了从科学、技术、实践三个层次相互联系的研究和解决复杂性问题的方法论。这才是真正的探索、研究和解决复杂性的方法论。

最后,我们还想指出一点,人类虽然创造了许多技术,直到今天的各种高新技术和尖端技术,但还没有哪一种技术像系统工程那样,对社会发展的四大侧面建设都能发挥重要推动作用,仅就这个特点来看,系统工程的产生和发展是人类改造世界能力的飞跃,是一场意义重大、影响深远的技术革命。

### 参考文献

- (1) 钱学森同志给许国志同志的信, 1992.11.27.许国志同志给钱学森同志的回信, 1992.12.12,《系统工程理论与实践》, No.2, 1993 年
- (2) 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》湖南科技出版社, 1991 年
- (3) 钱学森、于景元、戴汝为, 一个科学新领域—开放的复杂系统及其方法论,《自然杂志》, 13卷第一期, 1990 年.
- (4) 普朗克, 世界物理图景的统一性,《北大学报》, 第三期, 1987年
- (5) 钱学森同志给王寿云同志的一封信, 1992年3月2日.

- (6) 于景元, 从定性到定量综合集成方法及其应用,《中国软科学》, No.5, 1993年
- (7) 戴汝为、于景元、钱学敏、汪成为、涂元季、王寿云, 我们正面临第五次产业革命,《光明日报》, 1994 年 2 月 23 日
- (8) 方锦清, 混沌控制及其应用前景, 科技导报, 1994.5.