

系统工程与总体设计部

■ 中国航天系统科学与工程研究院 于景元 高露

1978年9月27日，钱学森等在文汇报上发表了《组织管理的技术——系统工程》一文，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。

系统科学和系统工程是现代科学技术体系中一个新兴的科学技术领域，并在迅速发展之中，而且越来越显出其强大生命力。

钱学森是公认的我国系统科学和系统工程的开创者和奠基人，从系统思想到系统实践的整个创新过程，在工程、技术、科学直到哲学的不同层次上，都做出了开创性贡献。这些成就和贡献具有非常重要的科学价值、实践意义和现实意义。

从现代科学技术发展趋势和特点来看,以下几个主要方面与系统科学和系统工程的产生和发展密切相关:

第一,现代科学技术发展呈现出既高度分化、又高度综合的趋势。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。这两个方面相辅相成、相互促进。从这个发展趋势来看,系统科学和系统工程的出现是科学技术高度综合发展的结果。

第二,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。复杂性研究和复杂性科学与系统科学有着密切关系。复杂性科学的开创者之一、诺贝尔奖获得者默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann)在其所著的《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到一起,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”。盖尔曼并没有说明这个新途径和新方法是什么,但从其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。

第三,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的出现和发展密切相关。

第四,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、人网结合等以人为主的系统思维方式。这种思维方式使人类有能力去认识和处理更加复杂的事物。这种系统思维方式也为系统论方法及其应用提供了理论基础和技术基础。

第五,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、人网结合等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。

第六,现代社会实践越来越复杂,其综合性和系统性随之越来越强。社会实践是系统的实践,也是系

统的工程,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,集中地反映出以上这些特点。本文重点介绍系统工程和总体设计部。

一 航天系统工程和工程总体设计部

钱学森在开创我国航天事业的过程中,也同时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。

航天作为一种大规模科学技术工程(又称复杂巨系统),是把科学技术创新、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,证明了系统工程技术的科学性和有效性,中国航天事业的成功也是系统工程的胜利。航天系统工程的实践也为后来钱学森发展系统工程,建立系统科学体系和系统论奠定了实践基础。

在实施以导弹、卫星和载人航天等航天科技为代表的大规模科学技术工程中,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、高可靠的型号产品来,这就需要有一套科学的组织管理方法与技术。

大规模科学技术工程是这样一类工程:既有科学层次上的理论问题要研究解决,又有技术层次上的高新技术要开发,还要把这些理论与技术应用到工程实践中,生产出产品来,并实现产业化或向其他产业扩散,以推动国民经济和社会发展与国家安全。它的实质就是把科学创新、技术创新、产品创新,乃至产业创新有机结合起来,实现了综合集成创新。这类工程的特点是规模大、投入高、影响大,具有跨学科、跨领域、跨层次、跨部门的特点。由于研制周期较长,通常采取使用一代、研制一代、预研一代、探索一代的并行发展战略。

航天系统中每种型号都是一个工程系统,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法。实践已证明了这套组织管理方法是十分有效的(图1)。

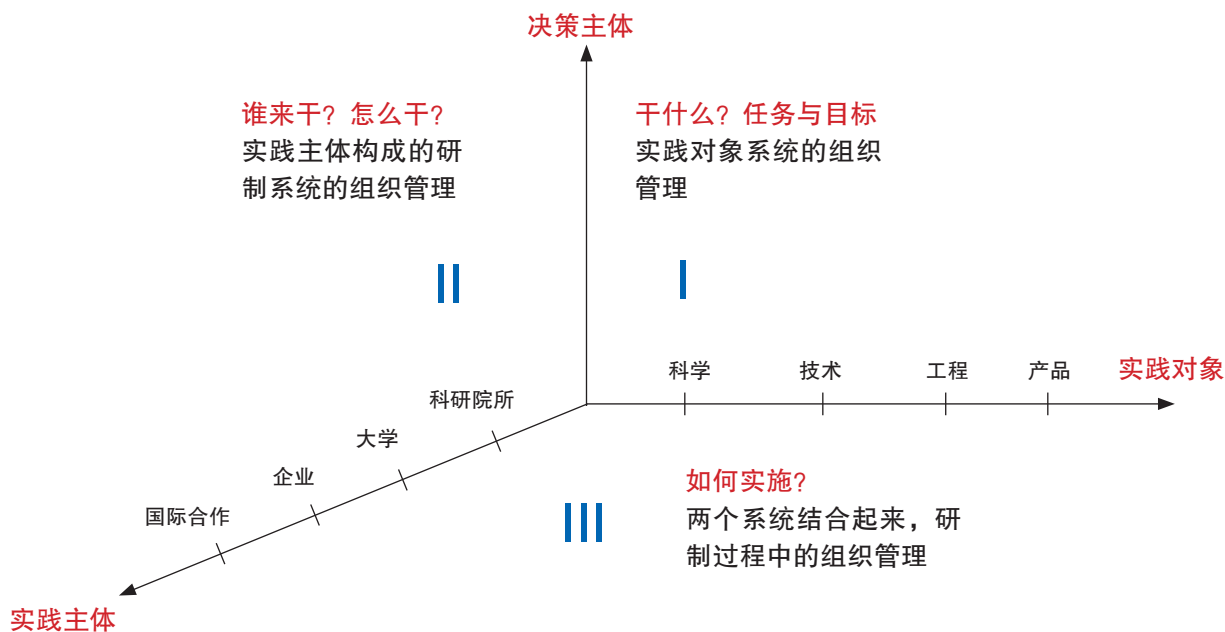


图1 系统工程实践

对于第一平面 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。这就涉及到工程系统的系统结构、系统环境和系统功能。完成这项工作需要有个研究实体，这就是工程总体设计部。

这个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（型号系统的系统功能），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，对型号工程系统的系统结构、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，给出总体方案。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。一旦为决策机构所采纳，再由相关部门付诸实施。航天型号工程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。

对于第二平面 II，根据已确定的总体方案，需要组织一个研制系统，这个系统涉及到科研院所、大学、企业及国际合作等，要投入人力、物力、财力等资源。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。但和上述工程系统不同，这里组织管理的是研制系统。这个系统也有系统结构、系统环境和系统功能的总体问题，还涉及到体制、机制等问题。在市场经济体制下，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方面。

对于第三平面 III，是把工程系统和研制系统结合起来进行研究，这是个动态过程，既有工程系统科

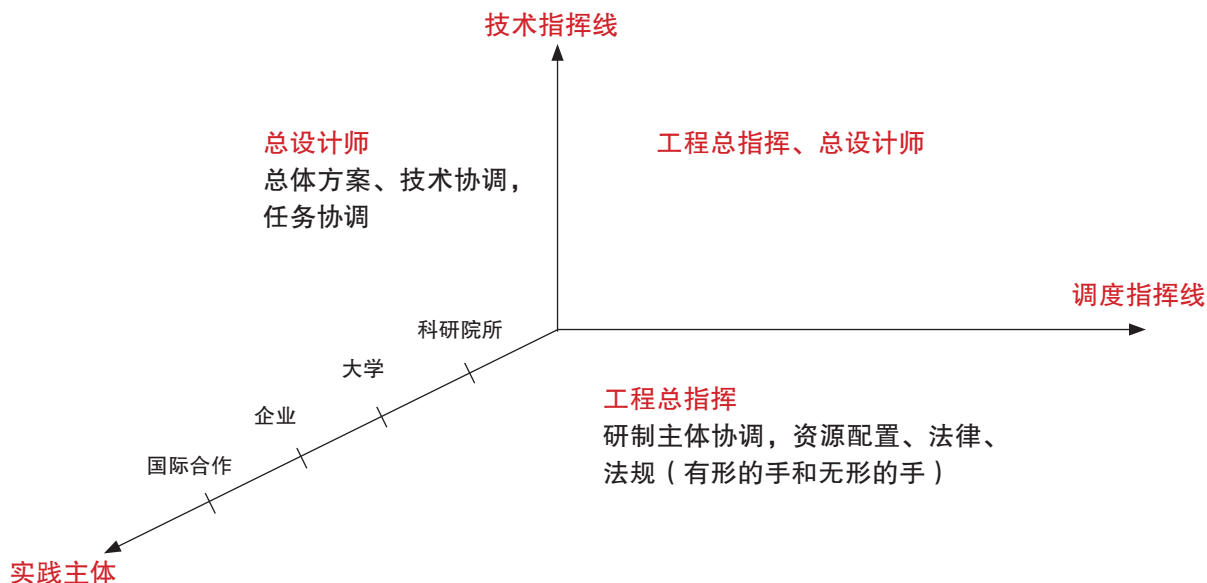


图2 工程系统和研制系统结合

学技术方面的组织管理与协调，又有研制系统的组织管理与协调，这就形成了两条线，一条是总设计师负责的技术指挥线，另一条是工程总指挥负责的调度指挥线，这两条线相互协调和协同（图2）。

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。

二 系统工程和总体设计部的发展

系统工程不仅适用于自然工程，其原理也同样适用于社会工程。从实践论观点来看，任何社会实践，特别是复杂社会实践，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：①实践对象，就是干什么，它体现了实践的目的性；②实践主体，是由谁来干和怎么干，它体现了实践的组织性；③决策主体，它要决定干不干和如何干的问题。

从系统角度来看，任何一项社会实践都是一个具体的实践系统，正如钱学森所说：“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。”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。

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、系统论、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，它体现的是系统实践论。这就是为什么系统科学和系统工程具有广泛应用性和强大生命力的原因。

在实践中，航天型号研制系统如何合理和优化资源配置等问题，也需要总体设计。工程系统和研制系统是紧密相关的，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，这个新系统要比工程系统复杂的多，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，这个部门就是钱学森提出的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工程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。本文由于篇幅所限,不能详细介绍。

总体设计部运用综合集成方法,应用系统工程技术,研究和解决系统实践和工程的组织管理问题,也就是把系统整体和组成部分与环境协调统一起来从整体上解决问题的系统工程管理,其体现的是系统实践论。

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,钱学森在讲话中说:“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。”

这里所说的科学体系,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、地理科学、军事科学、行为科学、建筑科学、文艺理论等所构成的现代科学技术体系和人类知识体系(图3)。

现代科学技术体系和人类知识体系,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、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,钱学森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。目前国内有的部门有些像总体设计部,但研究方法还是传统的方法。总体设计部实际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。前者以法律、法规和权力为基础,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

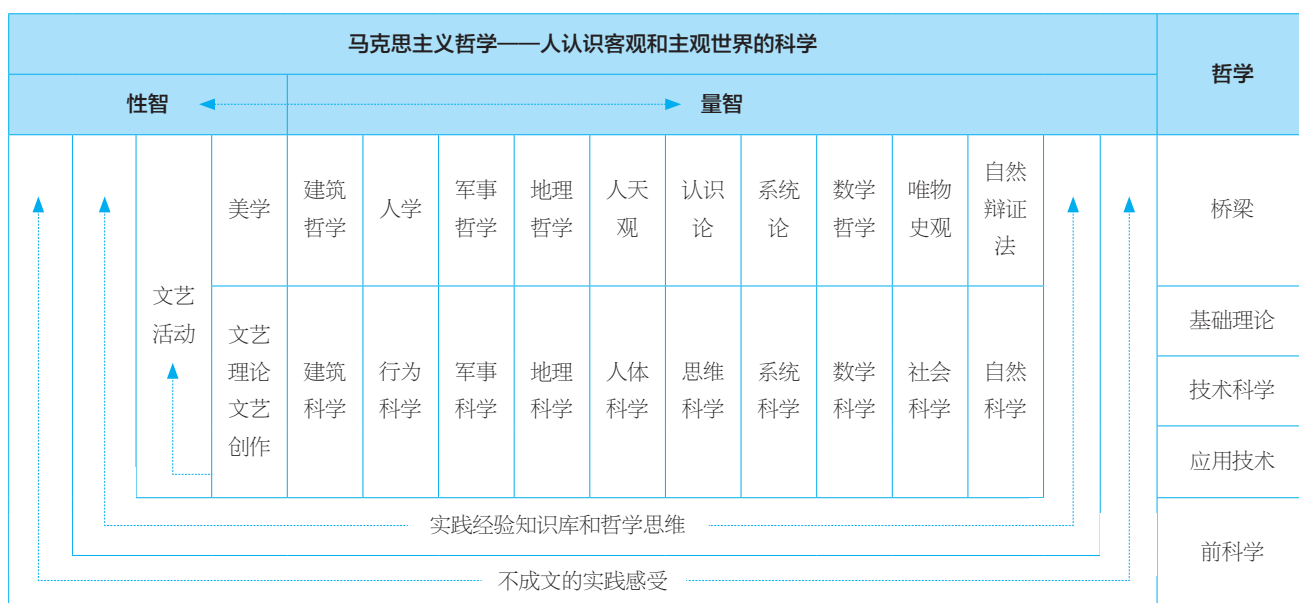


图3 人类认识世界和改造世界的知识体系

是体制、机制和运作上都是不同的，但又是相互协调和协同的，两者优势互补共同为决策机构服务。决策机构则把两者结合起来，形成改造客观世界的行动和力量。

从我国实际情况来看，多数部门是把两者合二而一了。一个部门既要做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、一个工程、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，这就是钱学森一直大力倡导的“要从整体上考虑并解决问题”。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法。

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。

三 结束语

钱学森从系统思想到系统实践的整个创新链条中，都做出了开创性贡献，这些系统性的创新成就也是目前国外所没有的，具有超前性、引领性和现实性，是对现代科学技术发展的重大贡献，有着广泛而深远的影响。我们应认真学习、研究和应用，并发扬光大。

综合起来看，系统科学和复杂巨系统科学及其体系所体现的是系统认识论；综合集成方法及其体系所体现的是系统方法论；系统工程体现的则是系统实践论。

系统认识论、系统方法论和系统实践论，便构成了钱学森系统论的主要内容，它不同于贝塔郎菲的一

般系统论，后者还是整体论。正如钱学森所说：“我们说的系统论不是贝塔郎菲的‘一般系统论’，比一般系统论深刻多了”。

系统认识论与系统科学和复杂巨系统科学体系，反映了钱学森的系统科学思想；系统实践论与系统工程，反映了钱学森的系统实践思想也就是系统工程思想；系统方法论与综合集成方法体系，反映了钱学森的系统综合集成思想。

系统科学思想、系统实践思想和系统综合集成思想，就构成了钱学森系统思想的主要内容。钱学森系统思想大大丰富和发展了辩证唯物主义系统思想。

1995 年，在“我们应该研究如何迎接 21 世纪”一文中，钱学森明确指出：“系统科学是本世纪中叶兴起的一场科学革命，而系统工程的实践又将引起一场技术革命，这场科学和技术革命在 21 世纪必将促发组织管理的革命。”并进一步指出：“系统科学、系统工程和总体设计部与综合集成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社会系统复杂性问题的方法论。它为管理现代化社会和国家，提供了科学的组织管理方法与技术，其结果将使决策科学化、民主化、程序化以及管理现代化进入一个新阶段。”

系统科学不仅是一门 21 世纪的科学，系统科学和系统工程还将在 21 世纪引起一场组织管理革命，这场组织管理革命对现代化社会和国家管理的推动作用将是广泛而深刻的，其意义和影响也是重大而深远的。我们应高度重视系统科学和系统工程的发展和应用。

习近平总书记非常重视顶层设计和总体设计。2017 年 9 月 22 日，习近平总书记主持召开中央军民融合发展委员会第二次全体会议上，在讲话中指出：“推动军民融合发展是一个系统工程，要善思于运用系统科学、系统思维、系统方法研究解决问题。”

党的 19 大胜利召开，标志着我国社会主义现代化建设进入了新时代，这也为系统科学和系统工程的发展和应用带来了新机遇。我们应该大力推进和发挥系统科学和工程学的革命性作用，为这个新时代的发展和进步，做出应有的新贡献！**中国航天**