

# 系统工程的本质

曹松<sup>1,2</sup>

1. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048

2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

**摘要** 从“工程”一词的语意着手, 对比分析了科学、技术和工程的区别, 从而辨析了系统工程的本质和基本属性, 并与系统科学、系统思维进行了区分, 总结了以人造系统为目标的工程项目中系统工程的定义, 梳理了系统工程与项目管理的区别与联系, 解释了各种系统工程说法的来源与其背后的含义。

**关键词** 工程; 系统工程; 项目管理

工程, 是日常生活和工作时经常使用的一个词语, 例如土木工程、电子工程、机械工程、系统工程, 以及法制工程、希望工程、菜篮子工程; 也有三峡工程、载人航天工程、探月工程等; 还有“创新是一项系统工程”“改革是一项系统工程”等说法。这个词语本身并没有令人费解的地方, 但在不同的语境中, 却体现出迥然不同的内涵, 如果不加以辨析和区分, 就会导致一些基本概念混淆。例如, 对于“系统工程”到底是什么, 就有各种定义和多种不同的解释, 甚至大相径庭。“工程”是辨析“系统工程”本质的钥匙。本文将通过对“工程”的语意分析, 辨析系统工程的本质。

## 1 在与科学、技术的对比中理解工程

1986年, 美国国家科学委员会首次提出“STEM”教育概念<sup>[1]</sup>, STEM是科学(science), 技术(technology), 工程(engineering), 数学(mathematics)四门学科英文首字母的缩写, 旨在强调在科学、技术、工程和数学领域综

合发展, 以提升美国未来人才的科技能力, 从而提高美国全球竞争力。而中国人常常把科学和技术混在一起说成“科技”, 而工程的概念也非常模糊, 其实科学、技术和工程是不同层次和范围的概念。

科学(science)源于拉丁文“scientia”, 本义是知识和学问的意思<sup>[2]</sup>。科学以探索发现为核心, 主要是发现、探索研究事物运动的客观规律。科学活动由好奇心驱使, 最典型的活动形式是基础科学研究, 包括科学实验和理论研究。进行科学活动的主要社会角色是科学家。科学活动的成果即科学知识, 其主要形式是科学概念、科学定律、科学理论甚至科学假说, 科学知识与其本身是否有用、能否带来经济效益和道德上的善恶无关。科学知识的成果形式是论文、著作。

技术(technology)由希腊文“techne”(工艺、技能)和“logos”(词, 讲话)构成, 意为工艺、技能<sup>[2]</sup>。技术以发明革新为核心, 着重解决“做什么和怎么做”的问题。技术活动由问题(problem)驱使, 最典型的活动方式是技术开发, 其主要社会角色是技术员、发明家。技术知识

收稿日期: 2018-03-23; 修回日期: 2018-05-01

作者简介: 曹松, 副研究员, 研究方向为项目管理与系统工程, 电子信箱: caosong@nssc.ac.cn

引用格式: 曹松. 系统工程的本质[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 43-47. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.20.007

的基本形式是技术原理和操作方法,表现形式为技巧、技能、技艺。技术活动成果形式主要包括专利、图纸、配方、诀窍等。

工程(engineering)最早产生于18世纪的欧洲,其本义是兵器制造、军事目的的各项劳作,后扩展到许多领域,如制造机器、架桥修路等<sup>[2]</sup>。工程以集成建造为核心、以新的存在物为标志<sup>[3]</sup>,着重解决“做出了什么”的问题,强调改造客观世界的实际效果<sup>[4]</sup>。工程活动由产品驱使,主要社会角色是工程师。工程活动的成果主要是各类人造系统(man-made systems)。将实际改造世界的物质实践活动和建造实施过程知识化,形成的就是工程方法,是一种面向实践的技能和方法,主要成果形式是工程原理、设计和施工方案等。

在汉语中,“工程”一词古已有之,原意是“土木构筑”,即建筑施工,后演化为“用比较大而复杂的设备进行的工作”或“需要较多人力、物力来进行的大而复杂的工作”<sup>[5]</sup>。“工程”这里含义是工作、任务或事业(work, task, enterprise),强调其复杂性、艰巨性。例如,口语中常说的“这可是个大工程啊!”就是这个意思。但一旦工程被设定了明确目标并加以时间、经费等约束条件,“工程”的含义就扩展到了“项目”(project 或 program)了。例如,三峡工程、南水北调工程,以及曼哈顿工程(Manhattan Project)和阿波罗工程(Apollo Project)、载人航天工程(China Manned Space Program)……所以,汉语中的“工程”对应了多个含义,需要在不同语境下加以区分,识别真正的内涵。系统工程常见于这样的说法,“某某工作是一项系统工程”。例如,“解决就业问题是一项系统工程”“安全生产是一项系统工程”等,以及日常生活中老百姓的对话,“孩子的教育是一项系统工程”等。这些话语中的“系统工程”不是我们研制卫星、飞机、舰船的系统工程(systems engineering, SE)方法,其背后的含义是首先强调这是一个复杂、艰巨的任务,即“工作、任务或者事业”(work, task, enterprise),其次是强调对于这样复杂艰巨的工作和任务,必须使用系统思维,必须整体考虑、处理好方方面面的关系,才能完成好这项工作,推动事业发展。

工科高等院校里的工程学科专业,就是前面与科学、技术进行对比的工程,即“engineering”,例如,电子工程(Electronic Engineering, EE)、机械工程(Mechanics Engineering, ME)或软件工程(Software Engineering,

SE)等,传授与研究的就是我们非常熟悉的关于工程的技能和方法,培养的就是各个方面的工程师(engineer)。

## 2 明确系统工程与系统科学和系统思维的区别

就工程活动来看,系统工程与电子工程、机械工程、软件工程等一样,均是为实现项目目标,应用各类技术研制产品而实施的工程活动,只不过电子工程、机械工程或软件工程等是应用电子、机械或软件等专业技术实现电子线路、机械结构和装置、软件程序代码等的专业活动,而系统工程则是对各种专业活动进行控制、集成和协调的总体活动;电子工程、机械工程或软件工程等是各专业工程师的工作,而系统工程则是系统工程师的工作或总体工作。因此,把系统工程混同于科学层面的系统科学,以及哲学层面、方法论层面的系统思维,都是错误的。但是无论是在大学的教科书中,还是系统工程的专业著作中,我们经常看到这样的说法:“系统工程是系统科学的一个分支”“系统工程是研究复杂系统设计的科学。”这等于将科学与工程划了等号。

系统科学(systems science)是一门总结复杂系统的演化规律,研究如何建设、管理和控制复杂系统的科学。系统科学汇集系统各个方面的研究,以识别、探索和理解跨越学科多个领域和应用的诸多范围的复杂性特征模式为目的。系统科学所包括的理论主要有一般系统论、信息论、控制论和耗散结构论、协同学、突变论等。

还有很多教材和著作,将系统工程称为“系统工程学”也存在类似的问题。钱学森曾在《论系统工程》中明确地说:系统工程“不宜像有些人说的那样泛称为科学”,以及“提‘系统工程学’这样一个词就太泛了”“强调系统工程是要改造客观世界的,是要实践的。”<sup>[6]</sup>

系统思维或者系统思考(systems thinking)是把认识对象作为系统,从系统和要素、要素和要素、系统和环境的相互联系、相互作用中综合地考察认识对象的一种思维方法。它将面对的问题视为整个系统的组成部分,并考虑到问题的潜在影响,而不仅是对特定部分结果或事件作出反应。系统思维是整体性的思维,帮助管理者以整体的视野去认识和处理管理复杂性问

题,避免“只见树木”和只顾眼前利益带来的片面性<sup>[6]</sup>。

系统思维在工程领域的实践应用是系统工程,但是不等于系统工程。既然是工程,就不能同时又是思想。所以经常有人说:“要用‘系统工程’思想作指导,把我们的单位搞得更好。”或者“要用‘系统工程’理论,把这个项目做好”的说法也有问题。系统工程不是思想、理论,系统工程就是工程方法。这些语言里面的本意,其实是系统思维或者系统论的观点和方法,能够指导单位建设、组织管理的是考虑整体、注重关系、避免局部和片面的系统思维。

### 3 目标系统范围确定系统工程作用范围

系统工程产生于第二次世界大战后期,20世纪五六十年代霍尔(Arthur D. Hall)等的研究,特别是随着美国“曼哈顿工程”和“阿波罗工程”等重大项目的成功实践,系统工程得以快速发展,形成了一套成熟的方法体系,成为研制卫星、飞机、舰船等目标系统(systems of interest, SOI)的重要方法,得到了越来越多研究与应用。本文不妨称这些项目为工程项目,而所研制的卫星、飞机、舰船等都是人造系统(man-made systems)。人造系统一直是系统工程讨论的目标和范围。国际系统工程协会(INCOSE)在其系统工程手册中指出:“ISO/IEC/IEEE15288和本手册中所考虑的系统是人造的,被创造并用于明确的环境中提供的产品和服务,使用户和其他利益攸关方受益。”<sup>[7]</sup>

1978年,钱学森在《文汇报》上发表《组织管理的技术——系统工程》,指出“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都具有普遍意义的方法。”<sup>[8]</sup>这其中的“所有系统”是关键词,它将系统工程所瞄准的人造系统产品扩展到了社会系统,涉及到了“人”这个最活跃也最复杂的因素。以此为标志,中国的系统工程被推广到了管理领域,这篇文章也成为系统工程在中国发展的一个里程碑,掀起了全国研究和应用系统工程的热潮。随后出现了军事系统工程、农业系统工程、法制系统工程,以及环境系统工程、交通系统工程、教育系统工程、人口系统工程等,不下十几种。此后,对很多学者来说,系统工程的主攻方向转到了研究社会经济系统的组织管理问题。

这些领域都提高了以系统思维指导的自觉性,更加注重工作的整体性以及处理好各个元素的关系。以“交通系统工程”为例,仍然是原有交通管理专业的内容,但加强了交通规划的整体性以及统筹协调,这些都充分体现了系统思维的强大作用。扩展到社会系统的系统工程,其本质都是系统思维而不是系统工程在这些领域组织管理中的应用,它们与系统工程是“兄弟”关系而不是“父子”关系。

### 4 工程项目中的系统工程定义与特点

在国际上,美国电子工业协会标准EIA/IS632定义系统工程是一个综合全部技术工作的跨学科方法<sup>[9]</sup>。INCOSE定义系统工程是成功研制系统的一种跨学科的方法(approach)和手段(means)<sup>[7]</sup>。美国国家航空航天局(NASA)的系统工程手册认为系统工程是设计实现一个系统并对其进行技术管理、运行和退役处置的严格方法(approach)<sup>[10]</sup>。欧洲空间局(ESA)的航天标准化组织(ECSS)将系统工程定义为一个跨学科的方法(approach),综合协调将需求转化为实际系统的全部技术工作<sup>[11]</sup>。

中国航天系统工程方法是从需求出发,综合多种专业技术,通过全寿命周期分析—综合—试验的反复迭代过程,开发出一个满足使用要求、整体性能优化的系统<sup>[12]</sup>。中国商飞系统工程的定义是:以满足客户需求为目的,围绕产品全生命周期,通过产品集成与过程集成,实现全局最优的一种跨专业、跨部门、跨企业的技术和管理方法。

总结上述系统工程定义可以看出:系统工程是途径、步骤、方法(不是思想、科学、理论);相对于具体专业,系统工程是跨学科、跨专业的总体方法;系统工程通过全局优化致力于满足用户要求;系统工程面向目标系统的全生命周期。

### 5 工程的扩展含义论与项目管理的关系

将系统工程与项目管理混淆起来的现象也非常普遍。现在有很多专著、书籍和教材,以“系统工程项目管理”命名,内容将两个联系紧密但又有区别的知识体系混淆起来,其主要原因可能是汉语的“工程”包含了“项目”的含义造成的,因此必须加以区分。

项目是为创造独特的产品、服务或成果而进行的临时性工作<sup>[13]</sup>。项目管理的主要职能是对项目的计划、组织、指导、协调和控制。系统工程更多地关注所研制的系统(SOI)本身,更多地关注技术本身的问题,而项目管理致力于项目的全面成功,除了产品本身,也要考虑经费、进度以及团队多方面的成功。

工程项目的实施需要开展两类工作,一类是技术工作,表现为工程活动,例如需求分析、软硬件设计、软件编码、部件加工制造、集成和组装、试验与测试等,其主要责任人是工程师;另一类是管理工作,是为保障支撑技术研制活动而开展的计划、组织、协调和控制工作,例如,制定各类工作计划,监控项目成本和进度,实施采购和进行团队建设等,主要由管理人员完成。

在一个工程项目的实施中,系统工程方法首先体现为总体技术。现代几乎所有人造系统都是多个专业技术共同实现的系统,以复杂技术系统为研制目标的工程项目在这一点上更为突出。但系统工程不研究具体的专业技术问题,侧重于对系统总体问题(即系统构成要素、结构、信息交换和反馈机制等)的研究<sup>[14]</sup>。系统工程方法一方面从需求及大系统约束条件出发,经过权衡和综合得到系统体系架构和各层级功能、性能要求;另一方面从部件、分系统到系统逐级集成并验证,最终得到满足用户需求的系统产品。

同时,系统工程管理又是系统工程方法的重要组成部分。总体技术涉及多个门类的专业技术,综合集成成千上万甚至更多的部件和元器件,历经由多个阶段组成的生命期,需要不同团队人员的参与和协作,因此总体技术活动的有序开展,离不开充分的管理工作保证。例如,研制工作计划制定、技术需求管理、技术风险控制、技术状态控制等。技术管理过程是项目管理和技术团队之间的纽带<sup>[7]</sup>。

系统工程管理是项目管理的一部分,是项目管理中的技术管理。项目管理中的进度管理、经费管理以及质量管理和利益攸关方的管理等,是系统工程方法中定义用户技术需求、确定系统架构、开展技术评估评审和决策、开展验证和确认等技术过程和管理过程的输入和约束条件;系统工程又从技术管理层面提出了对项目人力资源管理、采购管理、沟通管理等的要求<sup>[15]</sup>。

工程研制项目包括两类工作,一类是技术工作,一类是管理工作;系统工程方法包括技术和管理两个方

面;系统工程技术是各类专业技术中的总体技术,系统工程管理是项目管理中的技术管理<sup>[15]</sup>。

## 6 结论

由于概念的外延不清晰,系统工程呈现出“打包拼盘”的情况,更有甚者将系统工程无限拔高,系统工程变成了一种无所不包、无所不能的“学问”,这样“包治百病”的拔高无异于对系统工程的“捧杀”,这很可能造成原本清晰的系统工程方法被淹没和异化,特别是系统工程的源头——航天等国防科技工业部门反倒说不清什么是系统工程了,从而在型号任务中不能顺利地实践系统工程。因此,必须还原各个概念,界定其内涵和外延,系统工程才能与系统科学、系统思维以及项目管理等各个层次各个专业的学科一起健康发展。

### 参考文献 (References)

- [1] 王如君. 美国“STEM教育”注重全面发展[EB/OL]. [2017-11-08]. [http://edu.cn.cn/list/20171108/t20171108\\_524016182.shtml](http://edu.cn.cn/list/20171108/t20171108_524016182.shtml).
- [2] 白春礼. 创新驱动发展战略靠什么支撑——从科学、技术、工程的概念说起[N]. 光明日报, 2014-05-15(16).
- [3] 殷瑞钰, 汪应洛, 李伯聪. 工程哲学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [4] 钱学森. 论系统工程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
- [5] 中国社会科学院语言研究所词典编辑室. 现代汉语词典[M]. 6版. 北京: 商务印书馆, 2012: 446-447.
- [6] 郭宝柱, 王琳琳. 组织管理的系统思维[J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 125-128.
- [7] Haskins C. Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities[M]. San Diego: INCOSE, 2015.
- [8] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程[N]. 文汇报, 1978-09-27(1).
- [9] Processes for engineering a system: ANSI/EIA-632-1999[S]. Government electronics and information technology association, 2003.
- [10] NASA. Systems engineering handbook (NASA/SP-2007-6105 Rev1)[M]. Washington DC: NASA Headquarter, 2007.
- [11] System engineering general requirements: ECSS-E-ST-10C [S]. Noordwijk: ECSS, 2009.
- [12] 郭宝柱. 系统工程辨析[J]. 航天器工程, 2013, 22(4): 1-6.
- [13] A Guide to the Project Management Body of Knowledge[M].

Pennsylvania: Project Management Institute.

[14] 林益明, 袁俊刚. 系统工程内涵、过程及框架探讨[J]. 航天器工程, 2009, 18(1): 8-12.

[15] 曹松, 郭宝柱. 系统工程——工程项目的总体技术与管理[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(1): 1-4.

## Nature of systems engineering

CAO Song<sup>1,2</sup>

1. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China
2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** To begin with the analysis of the linguistic meaning of the word engineering, this paper points the essence and characters of systems engineering (SE) on the basis of the difference between science, technology and engineering. The paper also summarizes the definition of SE applied in the engineering projects developing man-made systems, elaborates on the relationship and difference between SE and project management, explains the implication of various arguments about SE. This paper will help catch the essence of SE accurately which may contribute to the research and application of SE at present.

**Keywords** engineering; systems engineering; project management ●



(责任编辑 王志敏)