

工程系统与系统工程

栾恩杰¹, 陈红涛², 赵 滢², 胡良元²

(1. 国家国防科工局, 北京 100048;
2. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100037)

摘要: 从工程本体论出发, 讨论系统工程这种“组织管理的方法”如何保障工程的顺利开展、如何保障工程系统的设计建造过程、如何确保工程目标的实现。着重讨论两个密切相关又容易混淆的概念: 工程系统与系统工程。“工程系统”是指具体的某个工程及其产出物, 并且该工程具有系统性; 而“系统工程”不是工程系统本身, 而是工程系统设计建造的方法及过程, 两者统一于工程的进行过程之中, 是实现工程目标的两个支柱。简要介绍了系统工程的新进展——基于模型的系统工程。

关键词: 工程; 工程系统; 系统工程; 基于模型的系统工程

中图分类号: N945

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2016)05-0480-11

引言

工程是人类的一项创造性实践活动, 是人类为了改善自身生存、生活条件, 根据当时对自然规律的认识而进行的一项物化劳动过程^{[1]5}。一个完整的工程应当包括工程活动的全过程和工程活动的成果, 工程过程和工程结果不可分离, 最后的成果和产物是工程过程的组成部分^{[2]90}。如何保障工程过程的顺利开展, 得到符合人的要求的工程结果, 则需要系统工程这一方法的保障。

1 工程系统与系统工程的概念辨析

工程系统和系统工程是容易混淆的概念, 需要对二者的概念进行明晰地区分。

1.1 工程系统的定义及特征

从三元论的观点看, 科学、技术、工程是分不开的。科学技术是工程的支撑, 同时也限制工程。当前科学技术与工程的发展, 已经呈现出科

学、技术、工程“无首尾逻辑”的局面^{[3]324}。从科学、技术、工程的关系来看, 工程具有以下特点。

1.1.1 工程的特点

1) 工程必须关注结果和目标的实现

工程都有目标、指标、方案、投入、完成时间等具体内容和要求, 而这些都应当是可实现、可检查、可验证的, 而不是用诸如“应有好的质量、美观的设计、耐用的品质、安全放心”等描述性语句来表达。同样, 也不能在一个具体的工程项目中开展探索研究, 在工程阶段不允许“摸着石头过河”。

2) 现代工程是多学科跨领域的科学技术复合体

工程是技术的组合性应用。如航天的运载火箭, 就其动力而言, 不论是固体推进, 还是液体推进, 都属于化工范畴; 使火箭产生有效推力和有目的行为的, 是其控制系统和相应的阀门、管

路、传感器、执行机构,这些属于信息与控制范畴;火箭的最大部分是有极高的特殊要求的各种容器,如推进剂贮箱、各种高压的气体贮箱等,又属于材料、工艺、机械范畴。因此,火箭是一个综合体,是跨专业、跨学科综合的系统性成果。

3) 重大工程必须有必要条件说明

重大工程的跨学科特性,要求我们跨出具体学科的视角,在确定一个工程的时候,一定要询问与它相关的技术准备的怎么样了,这是工程确立的“必要条件说明”。比如现在有学者在谈论人类移居火星,要把火星变成适宜人类居住的星球,这是非常诱人的计划。但我们不能违背工程的特点——“必要条件说明”去决策。一旦讲到“工程”,如果没有经过“必要条件说明”就开展工程实践,则必然会碰壁。这种轰轰烈烈上马,凄凄惨惨收场的工程并不少见。

4) 工程需建立责任制与问责机制

工程项目必须建立责任制,工程项目的责任制建设也与工程结构一样是一个树形结构,每个人都在责任体系中占有一个相应的位置。工程需要问责机制,所谓问责就是对工程所确定的那些具体内容进行全面审计、审查并进行补充完善的过程。工程必须有具体的时间表和明确的路线图,而且必须要在定义和说明的共识下完成这些目标,否则要问责。我国航天“定位准确,机理清楚,问题复现,措施有效,举一反三”的技术归零五条标准和“过程清楚,责任明确,措施落实,严肃处理,完善规章”的管理归零五条标准充分体现了工程的问责,共同构成了航天质量的责任制和问责机制,并作为标准在我国军工行业得到了推广应用,同时在2015年被国际标准化组织采纳为国际标准 ISO 18238 Space systems - Closed Loop Problem Solving Management(航天质量问题归零)。

5) 工程必须关注全寿命周期

工程不仅要关注建造过程,更要关注之前的设计过程、论证过程,以及工程完工之后的运行、

保障甚至退役处置工作。工程首先要设计出来,设计方案决定了建造过程;工程交付用户后,需要持续的维修保障工作,以使工程系统恢复、保持其良好的状态,持续为用户提供价值,所以工程必须注重维修保障工作,同时保障性需要在前期的设计中予以充分关注,并和功能性特征一并考虑、协调,在设计方案中体现出来。对于某些特殊的工程,还要注重退役处置、报废的工作,如卫星在寿命期满后要合理处置,避免其变成太空垃圾、空间碎片,核电站的退役处置也要关注核燃料的污染问题。

6) 工程必须重视对自然环境和经济社会的影响

任何一项工程,特别是重大工程,一定会面临机会成本的权衡。工程总处于特定的自然和社会环境中,工程所用的原材料,来自特定的环境(自然环境);工程的设计过程、建造过程,是对周围环境的适应和改造;工程的产出物要交付给用户,放在用户的业务流程中运行,处于用户的环境中。因此,在工程的全寿命周期,都必须充分地考虑环境条件的支持和制约作用,关注工程对自然资源的耗费,开展工程的伴生物分析,履行工程的社会责任。

1.1.2 工程系统的定义

工程系统是为了实现集成创新和建构等功能,由各种“技术要素”和诸多“非技术要素”按照特定目标及功能要求所形成的完整的集成系统^{[2]74}。从工程哲学的视角来看,工程活动的核心是构建出一个新的存在物。工程活动中所采用(集成)的各种技术始终围绕着一个新的存在物展开,所以构建新的存在物是工程活动的基本标志。简言之,工程系统是工程的成果、产出物、交付物,是能够为社会、为用户带来益处的人工创造物。例如卫星工程,经过策划、论证、设计、建造、在轨测试,最后交付给用户的是一个符合设计要求、可以持续提供天基信息服务的卫星系统,这

就是卫星工程的成果、产出物、交付物。

工程系统之所以称为系统,是因为这一工程由许多部分组成,而且这些组成部分并不是各自独立的,它们之间具有紧密的关联性,即整个工程具有系统性。所有的组成部分构成了工程系统,这些组成部分包括各个系统及其部件,建造过程中的所有环节,工程所需要的各种资源,以及确保工程顺利实施的支持系统。从最终结果来看,工程系统是最终交付给工程需求者的客观存在物。工程系统具有整体性和层次性、统一性和协同性、目标一致性、匹配性等特征。

1.2 工程系统设计建造及运行的方法——系统工程

随着人们建造的工程系统越来越复杂、体系化更强,要求人们必须全面考虑建造过程中的各种影响因素,提前规划工程进展中遇到的各种问题,协调来自各单位的工程参与者,统筹考虑工程项目的质量、进度、成本问题。正如钱学森所说,“导弹武器系统是现代最复杂的工程系统之一,要靠成千上万人的大力协同工作才能研制成功。研制这样一种复杂工程系统所面临的基本问题是:怎样把比较笼统的初始研制要求逐步地变为成千上万个研制任务参加者的具体工作,以及怎样把这些工作最终综合成一个技术上合理、经济上合算、研制周期短、能协调运转的实际系统,并使这个系统成为它所从属的更大系统的有效组成部分”^{[4]10}。这个“基本问题”实际上就是系统工程所要解决的问题,这也是系统工程应运而生的背景。

20世纪60年代至70年代初,随着美国阿波罗工程的实施,美国国家航空航天局(NASA)提出了最初的系统工程理念和理论方法体系。可以说,阿波罗工程在技术、管理上的复杂性,以及工程成败对政治、经济、社会影响的深远性,决定了系统工程产生的必然性。

大部分航天工程都具有阿波罗工程的特点,

这些工程都必须保证在技术上、管理上不出纰漏,不发生重大失误,避免经济损失和人员损失及其对国家声望带来的不利影响。因此,重大工程实践及科技事业的发展也在不断推动系统工程的进步和完善。

在航天之外,系统工程在其他领域也得到了普遍的应用。例如,系统工程已成为商用飞机行业通用的指导飞机研制的方法,各主要民机制造商、行业协会和相关机构都围绕系统工程应用,编制了大量的指导方法和标准。例如,SAE ARP4754A《民用飞机及其系统的研制指南》是航空领域一份重要的实践指南,将系统工程和安全性设计融入到了民用飞机研制和适航取证过程中。系统工程在国际飞行器研制过程中已经得到广泛应用并取得了显著的效果,并在波音、空客、米格等巨头公司最佳实践经验中得到了总结和提升^{[5]84}。

实践证明,对于复杂工程系统来说,系统工程是行之有效的方法体系。复杂工程的从业者必须用系统工程来保证工程系统是优质的,是符合社会需要的,能够按时且在成本预算内完成。从本体论来说,系统工程的运用对象是工程系统;从指导工程系统建造的方法论来说,系统工程强调的是一种方法和手段;从工程实践活动看,系统工程重在运行。

钱学森院士对系统工程的定义是:“系统工程是组织管理系统的规划、计划、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都有普遍意义的科学方法。”^{[4]12}所以我们认为钱老的定义是将系统工程归于方法论这一范畴,在工程方法论中有重要的位置。

1.2.1 系统工程概念辨析

目前,工程界、学术界对工程系统的界定、定义、内涵争议不大,但对系统工程(英文 Systems Engineering 的翻译),从名称的翻译到具体的内涵,都存在某些争议,主要包括以下三个方面。

1) 系统工程是方法还是“工程”?

实际上, Systems Engineering 中 Engineering

是动词 engineer 的动名词,engineer 作为动词的含义是“策划、设计、建造等”,此处的 engineering 不是名词,不是电子工程(Electronic Engineering)、铁道工程、水利工程中的工程。Systems Engineering 这个短语是动名词后置,其含义是 how to engineer a system? 即如何策划、设计、建造、运行一个系统,强调的是方法,以及相应的步骤、流程、程序,强调把系统设计、建造出来的过程,因为方法的运用必然要通过一系列活动、经历一系列的步骤和过程,持续不断地运行。

系统工程的最新国际标准《系统和软件工程——系统寿命周期过程》(ISO 15288 2015)给出了系统工程的最新定义:系统工程是“管控整个技术和管理活动的跨学科的方法,这些活动将一组客户的需求、期望和约束转化为一个解决方案,并在全寿命周期中对该方案进行支持”^{[6][10]}。同时,Systems Engineering 一词在国外是有固定含义的术语,也出版了很多标准、规范,如美国的军用标准 Mil-Std 499、NASA 的系统工程手册、欧洲的 ECSS-E-ST-10C(空间工程——系统工程总要求)等等。

追根溯源,为统一对“系统工程”的理解,应明确系统工程是工程系统设计、建造及运营所采用的方法和技术。

2) 社会上广泛使用的“系统工程”是否是系统工程?

在我国,“系统工程”这一术语到目前仍没有一个统一的标准语言来进行定义,尚未取得完整性的共识。同时,由于“系统”和“工程”的概念很普及,因此,“系统工程”在我国的语境下极易被理解为“系统性的工程”、“复杂的工程”、“牵涉面比较广的工程”这类描述性的概念。许多工程都被冠以“系统工程”的称号,例如经常说“某某工程”是一项“系统工程”,其本意是强调该工程的复杂性,说明工程由多层次、多环节构成,并且受到许多因素的影响和制约,是“系统性的工程”(此处工程的含义是 project,是工程项目),

是需要采用系统工程方法来开展工作的工程项目,其目的是引起各方面对工程项目的重视,促使相关部门开展协调和配合,例如,三峡工程是一项系统性的工程。这种将“系统工程”作为描述性词汇的做法,误解了系统工程作为方法的本意,实际上这种误解仍然源自于把系统工程当作“工程”而不是方法。

3) 广义系统工程与原义的系统工程之分

钱学森在 1978 年提出工程项目应当采用系统工程后,又将该方法推广到社会系统中,提出了经济系统工程^{[7][80]}、教育系统工程、法治系统工程等^{[8][178][9][79]},也引发了 1980 年代的系统工程热,大学也开展了系统工程专业,出版了很多系统工程教科书,但这些大都是社会系统层面的系统工程,也可以说是广义的系统工程。对应用于航空、航天、船舶、铁路等领域的系统工程,研究与探讨并不多,由于所处理对象的不同,这两个层次的系统工程分别称为广义的系统工程 and 原义的系统工程。但两者的核心是相同的,都处于系统科学中的工程技术层次,都是在系统思想指导下开展相关工作。

综合以上三点,我们明确本文讨论的系统工程是工程系统设计、建造与运营的方法,是组织管理的技术,是原义的系统工程,更具体地说,就是工程系统工程(区别于处理社会问题那种“广义”的社会系统工程、系统方法等)。

1.2.2 国内外学者和文献对系统工程的定义

日本工业标准(JIS)《大英百科全书》(1974 年)《美国百科全书》(1975 年)《苏联百科全书》(1976 年)《中国大百科全书—自动控制与系统工程卷》等有类似的定义,即:“系统工程是一门研究复杂系统的设计、建立、试验和运行的科学技术”^{[10][79]}。

这些定义内涵大体一致,即认为系统工程是设计、建造工程系统的一整套的方法和技术,此处的技术并不是具体工程项目中应用的电子技术、机械技术,而是组织管理的技术。

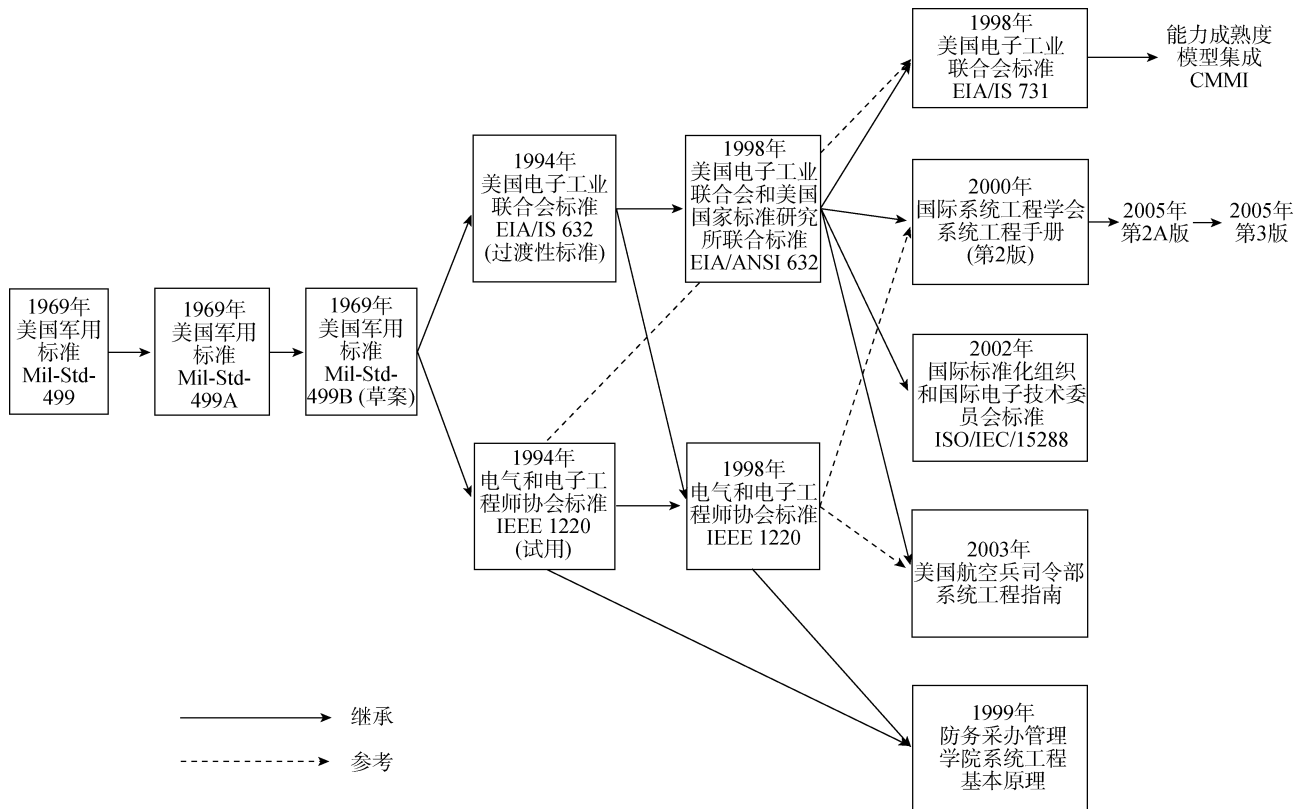


图1 国外系统工程标准的发展演化路线图

系统工程在国外重大国防和航天项目的推动下迅速发展，从军用标准演化到商用标准，在军用和民用工程技术领域都取得了很大的成功^{[11]2}。这些系统工程的标准、手册等，表明了国外对系统工程内涵理解的一致性、共识。

1.2.3 系统工程是指导工程实践的方法论

钱学森认为，“系统工程就是从系统的认识出发，设计和实施一个整体，以求达到我们所希望得到的效果。我们称之为工程，就是要强调达到效果，要具体，要有可行的措施，也就是实干，改造客观世界”。所以，系统工程的实践性很强，要讲究实干，要面对实实在在的现实世界，面对各种约束条件。

如何保证工程目标的实现，而且是完美地实现，是系统工程成为“组织管理系统的技术”的关键。认识总结国内外航天工程实践的经验和教训，不断完善工程师的知识和本领，用系統工程的理念、概念、经验和方法，依系統工程的程序

和原则来指导工程实践，这是我国航天工程成功的基本经验。这些经验也值得其他工程行业参考和借鉴。

2 系统工程运行

从时域上讲，系统工程运行是指从系统的论证开始，到工程系统的设计、建造、完成并交付，以及工程系统的运营、维护，一直到其寿命期结束。从内容上讲，系统工程运行则指工程系统任务书的形成（论证、立项结束）、工程系统的技术设计、工程系统的建造及验证、工程系统的最终验收和交付，以及工程系统寿命期（合同确定的运营期）的服务和保证^{[12]34}。

2.1 系统工程包括技术过程和管理过程

技术过程就是从用户的需求变成实际产品的过程。如图2中下半部的V型图所示：左边是一个自上而下、从用户需求开始将系统逐层分解为

分系统、单机、零部件、原材料的过程; 右边是把最低层次的零部件自下而上逐级进行组装、集成、验证, 形成系统, 交付用户, 满足用户需求的过程。技术过程的输入是用户的需求文档, 供应商的原材料、零部件及其技术信息等; 输出是导弹系统的设计方案和飞行样机, 飞行样机依据设计方案而制造出来。整个技术过程存在两条线的变化, 一是信息这条线, 把用户的需求文档和零部件信息变成了最终的设计方案 (也是一大堆信息、文档、符号), 二是实物这条线, 把各种原材料、零部件变成能够飞行、基本满足用户需求的样机。技术过程的有序开展, 可以使得参研人员、部门、单位之间的技术沟通更加地顺畅、有效, 为商务沟通奠定基础。

管理过程包括技术管理过程和项目管理过程, 也就是图 2 的上半部分。因为技术过程的各个步骤、子过程, 是由不同的团队、机构、人员完成, 需要从技术的角度进行协调、管理, 以确保设计方案的技术正确性、可行性, 技术管理过程就是对这些活动从技术的角度进行计划、组织、协调、控制的过程, 主要包括技术规划、技术控制、技术评估、技术决策等。技术管理过程的每一个环节, 都要覆盖到 V 型图的所有步骤。项目管理过程在技术管理过程之上, 把复杂工程系统研制当作一个项目来管理, 为技术过程确定了技术、成本、进度三要素相平衡的目标、计划, 向技术过程提出要求、提供资源、提供保障, 并在实施过程进行控制。

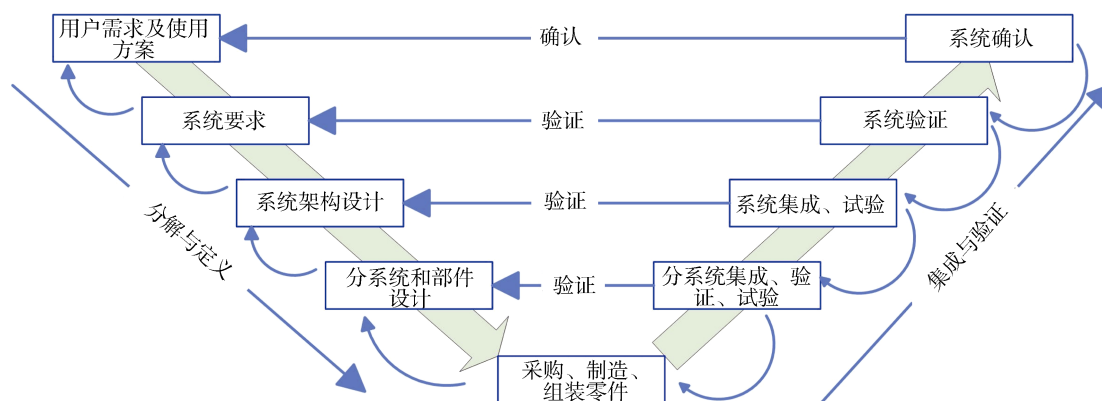


图 2 系统工程的技术过程和管理过程

技术过程和管理过程是系统工程相互联系、不可分割的两个层次, 有些文献把管理过程中的技术管理划归为项目过程, 但实质是一样的。狭义的管理过程, 仅包括技术管理的几个步骤, 如技术规划、技术控制等。

管理过程非常地重要。例如美国总统肯尼迪说, 美国有数千名知道如何建造金字塔的人, 但没有一个人知道该不该建, 说的就是重大工程项目立项论证、决策的困难性。

2.2 总体设计部在系统工程运行中的作用

总体设计部在系统工程运行中发挥着重要作

用, 其主要职责是开展总体方案设计、技术抓总和协调。总体设计部既要负责工程系统, 又要负责系统工程运行, 是工程系统和系统工程的结合点。

总体设计部设计的是系统的“总体”, 是系统的“总体方案”, 是实现整个系统的“技术途径”。总体设计部一般不承担具体部件的设计, 却是整个系统研制工作中必不可少的技术抓总单位^{[4][11]}。

2.2.1 总体设计部对工程的总体性能负责

所谓总体, 主要是指某种人造系统的建造目的、整体结构、整体运行机制和整体功能的总称, 是人们对这一人造系统整体的看法和认识。总体设计部负责进行总体方案设计和论证, 并进行系

统的分解和综合。总体设计部在两总（即总指挥、总设计师）的领导下，根据任务的要求，用系统分析的方法进行大系统指标论证、外部环境和约束条件分析、总体方案（包括技术途径、经济性和可行性）论证、流程设计，选择总体参数和构形，以确定系统体系结构的组成和功能。

如果没有总体设计部，就没有具体的机构来为工程总体负责，就无人对工程总体性能、效能、目标负责，无法确保工程指标能够分解下去、流动下去，系统工程就无法正常运行起来，也就无法保证工程目标的实现。

2.2.2 总体设计部负责工程任务大总体的协调

总体设计部的重要作用，不仅体现在技术抓总上，还充分体现在做好总体技术协调上。

首先，进行技术协调是实现总体技术抓总的重要手段。由于工程系统是集多专业、多学科技术于一体的综合技术体系，各分系统间存在相互关联、相互制约的关系，任何一个分系统的状态变化，必然要引起相关系统相应变化，甚至要牵动总体的变化。比如铁路工程设计中，涉及路基、轨道、车辆、通信、信号等多个专业，如果不进行及时有效的接口协调和界面关系界定，则容易出现很多矛盾和不协调的地方，导致工程无法进行下去，因此，我国铁路部门及时总结经验教训，在铁路工程设计中全权委托设计院对铁道工程项目进行技术总负责，充分发挥总体设计部的作用，取得了很好的效果。

其次，总体部负责系统整体的技术状态控制。工程系统内部各分系统、各零部件之间互相依赖、互相制约，某个零部件的小改动，可能会对其他部分造成很大的影响，会对系统造成很坏的影响甚至导致任务失败。严格的技术状态更改控制机制，可以保证系统研制的完整性和追溯性，该职能由总体部负责。

2.2.3 总体设计部对工程系统中各部分进行接口协调

总体技术协调的关键是技术接口关系。工程

系统的整体功能，是以分系统的功能为基础，并按严格的预定程序相互传递和反馈得以实现。但是，系统功能的相互传递，又是通过系统间的技术接口来实现的，技术接口关系是否协调，就成了实现系统整体功能的关键。所以，在研制的各个阶段，总体技术协调必须把技术接口的协调放在十分重要的地位。

2.2.4 总体设计部负责工程系统的整体验证与考核

为保证在工程系统交付后符合用户需求，总体部要负责工程系统的整体验证与考核，要进行系统试验和系统使用方法的总体设计，提出各种试验和使用设施的技术要求，或对现有试验和使用设施提出采用或改造的建议。比如，运载火箭研制的总体部，需要制订一整套严密的地面试验计划和可靠性保证大纲，以便从元器件、原材料试验开始，依序进行部件、整机试验，分系统的综合试验，以及全箭的各种试验，使问题尽量在地面得到检验与考核^{[13]7}。

3 工程系统与系统工程的联系与区别

工程活动综合运用多种技术造出新的东西，实现某种新的功能，因此工程活动必然伴随着物的创造和建造，工程系统就是工程活动的产出物、建造出的物，是人类在改造自然界中的产物。工程活动的目的是建造一个“新”的工程系统，来满足人们有关方面的需求。

我们要在工程活动中观察和理解工程系统。工程是创造和建构新的社会存在物的人类实践活动。对工程的理解也不能仅仅停留在工程本身，一个完整的工程应当包括工程活动的全过程和工程活动的成果，工程过程和工程结果不可分离，最后的成果和产物只是工程过程的组成部分。

3.1 工程系统是工程活动的产出物

工程系统（engineered system）就是工程这项造物活动中所造出的那个“物”、那个系统，并且

通过人对“物”的操控、利用、使用,来为人的生存、生活、生产、发展进步提供益处、创造价值。如嫦娥工程的工程对象系统由卫星系统、运载火箭系统、发射场系统、测控通信系统、地面应用系统组成。

人们需要的是工程系统的运行所产生的服务,如三峡工程建成之后,交付运营方去长期地运营、维护、创造效益;青藏铁路建成后,交付铁路公司去运营;嫦娥卫星建成、发射、测试后,交付地面站去运营、管控、收集资料、分发数据。

3.2 系统工程是指导复杂工程系统建造的方法论

工程系统是工程的结果、产出物、交付物,工程系统的设计和建造依靠技术设计完成,其技术基础是自然科学相关学科的理论;而系统工程是工程系统的建造过程,是工程的组织管理的技术,属于行为科学,其技术基础是系统工程运行理论及相应工程学科的支持^{[12]294}。工程系统是“硬的”科学技术的集成,系统工程是软科学,是一套科学的方法体系,具备方法论的意义。

工程系统是实物的存在、建造、运行、维修,系统工程是整个建造、运行过程的组织管理,两者共同形成实现工程目标的两个支柱。

4 工程系统和系统工程的发展

人类生产生活、科研等各方面所需的产品、系统越来越复杂,工程系统的规模和复杂性在持续地增长,这体现在以下方面:使命任务更加复杂艰巨、运行环境更加恶劣苛刻、系统规模更加庞大、且要求掌握多方面的知识和技术。

4.1 工程系统的使命任务和技术构成越来越复杂

4.1.1 工程系统的使命任务更加复杂

工程系统担负着越来越复杂的使命任务,操作过程也非常繁杂。人类研制的工程系统从运载火

箭、导弹、卫星到深空探测器等,都面临着更长寿命、更高可靠性、难以维修保障等方面的挑战。

以航天装备为例,随着科学探索和商业航天的不断发展,航天装备逐步向大型化、长寿命周期方向发展,大型通信卫星转发器已达到上百个,最长运行寿命可达15年,造价在10亿美元以上。美国哈勃望远镜是大型航天装备的代表,长13.3米,直径4.3米,重11.6吨,造价近30亿美元,已在轨运行25年,期间只经历了5次维护保障,而其继任者詹姆斯韦伯望远镜的造价高达88亿美元。

4.1.2 工程系统的使用运行环境更加复杂

一是自然环境更加恶劣。例如航天装备在空间环境中工作,空间环境通常指地面上几十公里以上的广大宇宙区域,除真空(导致排气、冷焊等问题)、微重力(液体处理问题)、极端温度等因素外,在空间环境中的原子氧会引起航天器表面材料的剥蚀;高能带电粒子会使航天器的微电子器件和设备产生单粒子效应(SEU),等离子体会使航天器表面和深层介质充放电(ESD);空间碎片和流星体会使航天器及其设备产生机械损伤等,这些都将可能引起航天器运行、通信和导航的崩溃。因此,航天装备制造必须要充分考虑严酷的空间环境所造成的影响,应用和采取有效的防护技术和措施。

二是与更多的系统进行互联互通互操作。以武器装备为例,目前的武器装备都体系化发展,新研制的装备必须“融入”已有的装备体系,也就是互操作性要好。比如研制一款新型战斗机,不光考虑飞机这一作战平台本身,而且要考虑飞机和各个类别的作战平台的互联互通互操作,如水面的舰艇、地面的战车、空中的预警机等,在侦察、预警、识别目标、打击、评估等作战全过程中,整个作战体系的武器装备都要连在一起。

三是处于复杂的电磁、信息环境中。系统在整个寿命周期中的绝大部分时间都要与外部的信息网进行信息交互。比如作战时要进行数据装订以及作战指令的发出;维护时要靠系统自身的机

内检测设备进行检测。

4.1.3 工程系统的技术复杂性

首先,工程系统的规模更加庞大,系统元素的种类及数量多、层次多,元素之间的联系多,相互耦合。涉及的专业知识门类多,需要考虑的专业工程多,对可靠性、维修性、安全性等的要求更加地苛刻。例如航天装备高度复杂,由多学科、多领域的技术集成而成,形成一种技术高度密集的多学科大系统。以航天光学遥感器为例,集光、机、电、热等多种技术于一体,具有形状复杂、精度高等特点,航天光学遥感器的制造包括原材料及元器件准备、结构加工、电装、单机装调、光机装调、相机总装测试、单机试验、相机整机试验等一系列过程,研制流程复杂,接口众多,协调难度大。

其次,工程系统中软件的比例大幅度上升,已经成为主要矛盾。系统中软硬件相互耦合,软件和硬件之间的界面、界限开始模糊,软件所发挥的功能由原来的 7% 增长到 70%。

4.2 工程系统的复杂性和工具的进步推动系统工程向基于模型方向发展

随着人们所研制的工程系统越来越复杂,传统系统工程 (Traditional Systems Engineering, TSE) 越来越难以应对使命,与此同时,以模型化为代表的信息技术也在快速发展,因此在需求牵引和技术推动下,基于模型的系统工程 (Model-Based Systems Engineering, MBSE) 应运而生。

传统系统工程中,系统工程活动的产出是一系列基于自然语言的文档,比如用户的需求、设计方案。这个文档又是“文本格式的”,所以也可以说传统的系统工程是“基于文本的系统工程”(Text-Based Systems Engineering, TSE)。在这种模式下,要把散落在各个论证报告、设计报告、分析报告、试验报告中的工程系统的信息集成关联在一起,费时费力且容易出错。

2007 年,国际系统工程学会 (INCOSE) 在

《系统工程 2020 年愿景》中,正式提出了 MBSE 的定义:MBSE 是建模方法的形式化应用,以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动,这些活动从概念性设计阶段开始,持续贯穿到设计开发以及后来的所有寿命周期阶段^{[14]45}。

在具体实现上,INCOSE 联合对象管理组织 (OMG) 在统一建模语言 (Unified Modeling Language, UML) 的基础上,开发出了适用于描述工程系统的系统建模语言 (System Modeling Language, SysML),软件提供商也开发了相应的支持 SysML 的工具,并且把 SysML 的建模工具和已有的专业分析软件如 FEA、CAD 等进行了集成,提出了 MBSE 的整体解决方案,具备了实际开发工程系统的基础。NASA、波音、洛马也积极采用 MBSE 开发各类工程系统,取得了很好的效果。

建模工具是工程实践中重要的工具。马克思说,“最蹩脚的建筑师从一开始就比最灵巧的蜜蜂高明的地方,是他在用蜂蜡建筑蜂房以前,已经在自己的头脑中把它建成了”^{[15]202}。工程系统的研制过程,实际上是建立工程系统模型的过程,也是一个借助模型来实现技术沟通的过程。工程研制中建立并使用工程系统模型,需要合适的建模语言、建模工具和建模思路,因此,系统工程工具、建模工具,是系统工程的重要组成部分。

建模仿真工具的发展进步推动了系统工程的发展,使其从“基于文本”向“基于模型”发展。MBSE 的提出,实质是基于自然语言的系统工程转到模型化的系统工程,把人们对工程系统的全部认识、设计、试验、仿真、评估、判据等全部以模型的形式进行保存和利用。

4.2.1 MBSE 促进工程系统和系统工程从伴生到融合

MBSE 下系统模型成为各专业学科模型的集线器。目前,各专业学科模型已经被大量应用于工程设计的各个方面,但模型缺乏统一的编码,也无法共享,建模工作仍处于“烟囱式”的信息传递模式,形成了一个“模型孤岛”,没有与

系统工程 workflow 形成良好的结合。在 MBSE 下,系统模型成了各学科模型的“集线器”,各方人员围绕系统模型开展需求分析、系统设计、仿真等工作,便于工程团队的协同工作。这就使得整个设计团队可以更好地利用各专业学科在模型、软件工具上的先进成果。

4.2.2 MBSE 推动系统工程的智能化发展

MBSE 出现后,系统工程的本质没有变,只是运行的形态发生了变化。MBSE 下,工程研制工作由过去的“80%劳动、20%创造”转变为“20%劳动、80%创造”。如同能战胜人类围棋高手的 AlphaGo 软件,其实质是让机器模仿人,发挥机器海量存储、高速计算、不知疲劳的优点,代替人从事繁重、繁杂、重复性的脑力劳动,实现人与计算机的更优化的分工,从而推动系统工程向智能化发展。

5 结语

本文讨论界定了工程系统的概念,明确了系统工程是工程系统设计、建造及运营管理的方法。指出工程系统和系统工程是实现工程目标的两个支柱,在工程系统建造和系统工程运行过程中,讨论了工程系统和系统工程的关系。特别指出系统工程要注重运行。工程系统的复杂性和信息技术进步推动系统工程向基于模型的方向发展,而基于模型的系统工程又进一步深化了工程系统和系统工程的融合,促进了系统工程的智能化发展。

参考文献

- [1] 徐匡迪. 工程师要有哲学思维[M]. //殷瑞钰,等. 工程哲学(第二版). 北京:高等教育出版社,2013.
- [2] 殷瑞钰,汪应洛,李伯聪,等. 工程哲学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2013.
- [3] 栾恩杰. 论工程在科技及经济社会发展中的创新驱动作用[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程,2014(4): 323-331.
- [4] 钱学森,许国志,王寿云. 组织管理的技术——系统工程[M]. //钱学森,等. 论系统工程. 长沙:湖南科学技术出版社,1982.
- [5] 郇鹏飞. 浅谈民用飞机系统研制中的系统工程运用[J]. 科技创新导报,2015(24).
- [6] ISO 15288. System and Software Engineering-System Life Cycle Processes [S]. 2015.
- [7] 钱学森,王寿云. 系统思想和系统工程[M]. //钱学森,等. 论系统工程. 长沙:湖南科学技术出版社,1982.
- [8] 钱学森. 大力发展系统工程尽早建立系统科学的体系[M]. //钱学森,等. 论系统工程. 长沙:湖南科学技术出版社,1982.
- [9] 钱学森,王寿云,柴本良. 军事系统工程[M]. //钱学森,等. 论系统工程. 长沙:湖南科学技术出版社,1982.
- [10] 高志亮,李忠良 编著. 系统工程方法论[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004(8).
- [11] 郭宝柱. “系统工程”辨析[J]. 航天器工程,2013(8).
- [12] 栾恩杰. 航天系统工程运行[M]. 北京:中国宇航出版社,2010: 34-35.
- [13] 王礼恒. 中国航天系统工程[J]. 航天工业管理,2006(10): 60-64.
- [14] Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language[M]. NY, United States: Morgan Kaufmann OMG Press, 2012.
- [15] 马克思,恩格斯. 马克思恩格斯全集(第23卷)[M]. 北京:人民出版社,1972(12).

Engineered Systems and Systems Engineering

Luan Enjie¹, Chen Hongtao², Zhao Yan², Hu Liangyuan²

(1. *State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing 100048, China;*

2. *China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100037, China*)

Abstract: Based on the theory of engineering ontology, how systems engineering to support engineering process, to support the design of engineered systems, and to support the achievement of engineering goal are discussed in this paper. The distinction of engineered systems and systems engineering is emphasized. Engineered system refers to the concrete engineering project and its outcomes, and systems engineering is not engineered systems, but the design and building process of engineered systems, which are unified in the process of engineering project, and are two pillars of the goal of engineering project. This paper also briefly discusses the newly proceed of systems engineering called Model-Based Systems Engineering.

Keywords: engineering ; engineered systems; systems engineering; Model-Based Systems Engineering