

新时期航天体系工程模型研究

李明华

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100068)

摘要: 面对航天强国建设新机遇、国际形势纷繁复杂的新挑战、信息化技术发展对国防及军队现代化提出的新要求, 航天装备呈现体系化的发展趋势, 并要求指导系统工程的管理方法必须应时而变、顺势而为。本文通过总结和研判当前体系工程的国内外研究现状, 基于航天系统工程实践, 设计了体系工程动态演进过程, 构建体系工程的演进、过程和管理模型, 并对进一步优化体系工程实践提出思考建议, 为解决复杂系统工程问题和丰富系统工程理论提供参考。

关键词: 航天; 演进模型; 过程模型; 管理模型

中图分类号: N945 ; V57 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2021)06-0552-11

引言

系统工程自 20 世纪 40 年代提出以来, 该理论先后运用于美国“曼哈顿”计划、北极星导弹以及阿波罗登月计划并取得快速发展。20 世纪 70 年代起, 许多新的学科分支基于 Bertalanffy 的一般系统论飞速发展起来^[1], 如耗散结构理论 (Prigogine)^[2]、协同理论 (Haken)^[3]、突变理论 (Thom)^[4]、混沌理论 (Lorenz)^[5] 等。国内学者基于钱学森的系统工程理论^[6], 逐渐在国内发展形成系统工程学科的理论与方法, 并渗透到社会各行各业, 如三峡大坝、高铁、大型桥梁、航空航天、网络系统等大型工程, 影响深远。20 世纪 90 年代以来, 信息数据呈爆炸式增长, 科技成果转化速度加快, 以人工智能、量子信息、移动通信、物联网、区块链为代表的新一代信息技术加速突破应用, 给复杂系统工程的管理提出了更高要求。随着世界经济、科技、政治、军事、文化和社会等高速发展, 加之跨学科领域交叉融合研究与应用的

新态势, 如生态系统理论、经济学、管理学、社会学、心理学等, 现代复杂系统工程进一步表现为“多个系统组成的更大规模的系统组合”(DoD)^[7], 复杂的技术集成和系统管理问题日渐突出, 各类复杂系统比以往任何时候的规模更大, 内涵更加丰富, 边界更加模糊, 复杂程度更高, 对传统的工程管理理论和方法提出了前所未有的挑战。针对单个系统实现最优规划、设计、管理和控制的系统工程的思想, 已经难以适用信息时代复杂系统的正常运行, 体系 (system of systems, SoS)^[8] 和体系工程 (system of systems engineering, SoSE) 研究应运而生。

中国航天事业 65 年来的蓬勃发展过程中, 始终秉承系统工程的思想与理论, 完成了两弹一星、载人航天、月球探测、CZ-5 新一代运载火箭等一系列复杂系统工程。同时, 通过复杂系统工程实践, 在过程中不断丰富与完善系统工程理论与方法。随着建设航天强国的宏伟战略的提出, 航天复杂工程建设迎来了战略机遇期。在国际战略格

① 由美国贝尔电话公司提出。

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-10-20

作者简介: 李明华 (1962—), 男, 研究员, 研究方向为航天飞行器设计与控制、工程管理。E-mail: tangsaili@126.com

局和国家安全形势深刻变化的大背景下,国防及军队现代化要求航天装备不断向体系化方向发展,当前和未来一段时间是航天装备实现跨越式发展的关键时期。面对建设世界一流军队、培育具有全球竞争力的世界一流企业的新目标和新要求,航天型号研制生产无论从规模、复杂性、边界不确定性以及动态转化性和地理分布性,都比以往的系统工程有更加复杂的需求和管理方式,要求指导系统工程的理论与管理方法必须应时而变、顺势而为,从而更好地解决复杂系统乃至体系的问题。

本文从体系工程理论的发展历程入手,通过总结和研判当前体系工程的国内外研究现状,把握体系工程的一般理论与思想,基于航天系统工程实践,提出体系工程动态演进过程,以丰富体系工程理论与管理思想,为解决复杂系统工程问题提供参考,并对进一步优化体系工程实践提出思考建议。

1 理论基础

1.1 国内外研究现状

体系思想与理论源于体系现象与问题的发现,一般认为国外体系工程研究经历了三个阶段^[9-10]。

(1) 概念形成阶段。20世纪50年代到20世纪末。从最初用“体系”来表达对领域内一些复杂问题的理解,到体系正式进入系统工程领域研究人员的视野,开始尝试对体系进行定义并尝试提出研究体系问题的工程方法。

(2) 快速发展阶段。2001—2008年。类比系统工程的方法,建立研究体系问题的一些共性方法。美国成立了依托国防采办大学的体系工程研究中心和依托老道明大学的国家体系研究中心,标志着专业化体系工程研究机构的正式成立。

(3) 聚焦演变阶段。2008年以来。开始思考体系工程究竟如何发展才能更好地为各个领域提供帮助。军事界认为体系工程是系统工程的延续,

更加关注体系工程的技术与实际的体系产品。学术界更加关注体系的概念和现象,在夯实体系基础理论的同时不断探索体系的新领域。企业界更加关注体系工程中的架构以及不同架构带来的涌现性,通过更好的组织架构为大型组织带来更高的效率。

目前,国内体系研究尚处于初级阶段:20世纪90年代到2010年,中国国防领域的专家较为关注国外体系研究的进展,发表了许多介绍国外体系问题研究发展趋势的文章。2010年至今,体系工程理念在中国的热度达到了一个新的高度,体系工程成为了武器装备体系这一特殊体系的重要研究工具。近年来在体系需求论证、体系设计与建模和体系评估方面都有很多突出的成果。从研究领域看,目前国内多围绕武器装备体系,主要聚焦于如何提升联合作战条件下的作战效能和体系对抗能力^[10-11];也有一些学者对航空航天、船舶等领域开展了初步研究^[12-13];软件工程、智能运输、智能电网、社会科学等领域的相关研究则刚刚起步。从研究内容看,主要在体系工程的内涵^[14]、发展历程^[9,15]、体系工程过程^[9,15-17]、体系需求论证^[11]、体系设计^[18]、体系建模^[19-20]、体系评估^[21]等方面取得了大批研究成果。

国内外体系研究发展历程如图1所示。

尽管国内有些学者对体系工程的过程开展了研究,但对应不同的应用情景,体系工程的过程与步骤存在一定的差异性。随着多项巨型、复杂的航天重大工程先后启动,赋予航天系统工程新的内涵,传统的系统工程理论和方法已经无法全面适应现阶段航天企业发展、重大工程决策和研制管理的需要,迫切需要针对航天体系工程过程、技术步骤与方法开展系统性研究。

1.2 相关概念辨析

1.2.1 体系

目前,国内外有文献可查的体系定义有几十种之多,一般认为,体系是系统之系统,是由多

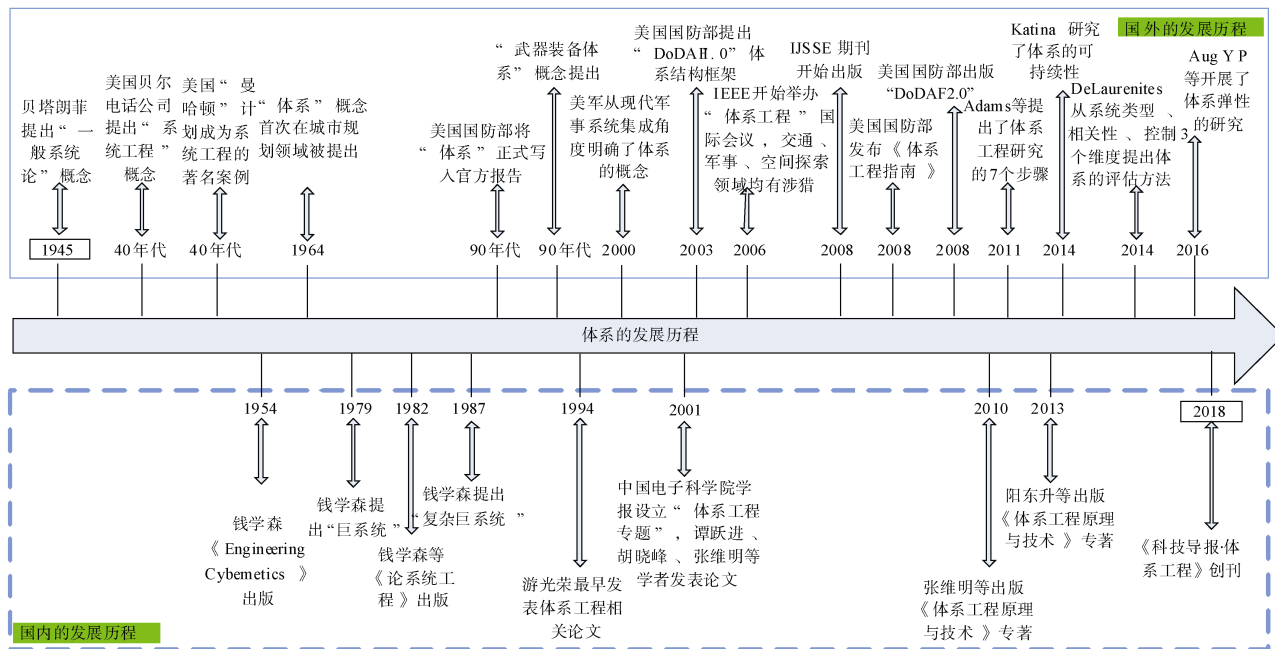


图1 国内外体系研究发展历程

个系统或复杂系统组合而成的集合，这些系统之间交互协作并产生整体能力大于部分之和的涌现行为。除了系统层级的复杂性之外，还需考虑体系独有的特性带来的复杂性因素。体系的复杂性度量值应是各个系统复杂性度量值的乘积，呈指数性增长。这些复杂性因素是体系工程管理必须体现和关注的。

(1) 体系的结构复杂性。体系成员系统之间的交互是通过网络来实现的。体系具有复杂的网络拓扑结构，网络的连通性问题以及部分网络节点失效后的网络重构问题都需要考虑。

(2) 体系的自主性带来的复杂性。由于构成体系的成员系统具有操作自主性和管理自主性，给体系层级的管理与体系能力的涌现带来了复杂性和不确定性。

(3) 体系的交互复杂性。体系组分系统间交互关系是非线性的，使得体系具有了不可预知的行为涌现性，其复杂性度量值应是各个系统复杂性度量值的乘积，呈指数性增长。

(4) 体系的动态发展性。体系的目标是实现反映用户关键需求的能力，这种能力反映的是用

户的关键需求，不是固化的、不变的，将随着外部环境、需求的变化、技术的改进和体系架构的升级不断提升。体系的核心是实现能力的快速、迭代式的发展，体系的建设、发展将持续进行，没有终结。

1.2.2 体系工程

正如系统工程来源于系统科学，在研究人员对体系的认识不断深入的过程中，对应于解决系统问题的系统工程发展出了针对体系问题的“体系工程”。综合学术界关于体系工程的诸多定义，可以认为，体系工程是为实现某一动态需求和目标，对一个由现有或新开发系统组成的混合系统的能力进行计划、分析、组织、集成和持续改进的过程，通过设计、引导组分系统间的互联、互通、互操作，以形成独立系统所不能实现的能力。

体系工程是解决复杂体系问题的工程化概念，其目标是建立新的体系发展流程，体系规划、评估、优化等技术支持，体系费用、能力、风险管理，体系动态演化等一系列工程技术方法论。体系工程需将体系的科学性问题转化为工程技术问题，将体系复杂问题“解构”“收敛”和“聚焦”。

1.2.3 体系工程与系统工程之间的关系

系统工程旨在解决产品开发和使用的問題。体系工程重在体系的规划与实施，它所追求的不是单一系统的最优化，而是追求不同系统网络集成的最优化，集成这些系统以满足可能是动态的目标。

体系工程是对系统工程的继承和发展，是系统工程发展到高级阶段的产物。它源于系统工程，但高于系统工程，以解决系统工程解决不了的体系问题，是一门高度综合性的管理工程技术^[22]。

2 体系工程总体架构

面对航天装备体系化发展涌现的新问题、新挑战，基于以往航天系统工程总结的经验与方法，以体系工程过程理论为指导，构建体系工程总体架构。

2.1 体系工程总体框架

2.1.1 体系的动态演进模型

体系工程的基本过程可总结为体系设计、体系验证和体系改进升级三大方面。体系设计和体系验证构成一个完整闭环，是体系工程的核心活动，包含需求生成、架构设计、系统开发、集成验证和能力评估五个步骤；体系改进升级则是新一轮体系设计和体系验证的重复，从不断发现需求、处理需求到实现体系的升级。前一个螺旋层的结束状态，对应体系下一次改进演化的初始状态，伴随新要求、新目标、新能力及外部因素的变化开始新一轮体系设计和体系验证，呈现开放性和发展性，形成了自我完善、自我革新、自我提升的动态闭环/螺旋上升式体系工程模型，如图2所示。作为体系各系统成员实现联系和交互的纽带，流程的贯通和数据的驱动对体系的螺旋演进过程产生核心推动作用。

2.1.2 体系工程的过程模型

体系工程活动呈双层V字形架构展开，通过虚实结合的体系级开发引领组分系统的开发，如

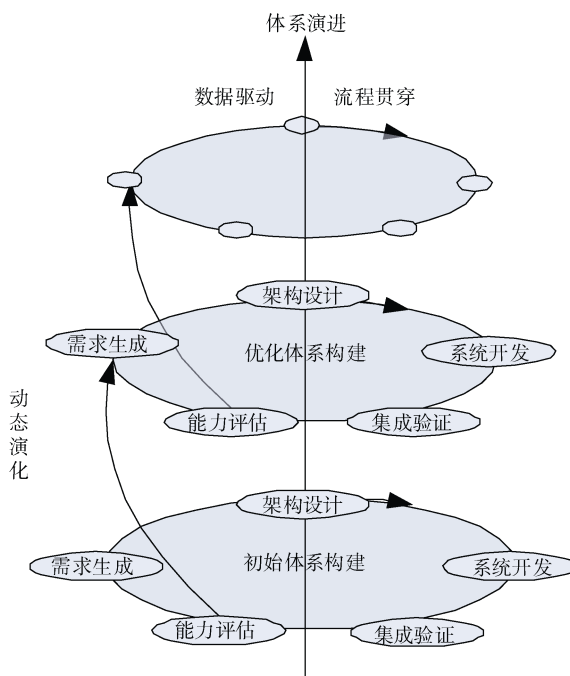


图2 体系螺旋演进的动态模型

图3所示。体系设计位于V字左侧，涵盖体系的需求生成和架构设计，实现从体系的核心使命到体系组分系统需求的层层分解映射；系统开发过程位于V字底层，承接体系需求，并将各组分系统进行逐层分解后进行集成验证；体系验证位于V字右侧，涵盖体系的集成验证和能力评估，实现从各组分系统到体系核心能力的层层集成和验证。

体系开发的初始阶段在项目生命周期角度可称为项目规划论证阶段，以基于模型的仿真推演为主、基于文本的分解传递为辅，在体系级组织机构的牵引下和各组分系统的论证参与下，历经需求循环-设计循环-集成循环-评估循环-整体循环，实现体系级的小回路闭合论证。体系项目组合的方案论证阶段主要明确各系统组分的输入，制定各系统开发计划，即基于文本的体系设计，并在仿真手段下得以验证；体系项目组合的执行阶段开展以实物为主的系统级开发、测试和评估任务，并处于体系级动态的协调、监测和促进下，经系统组分的实物集成、评估循环至满足能力需求后，实现体系实物层面初步构建的大回

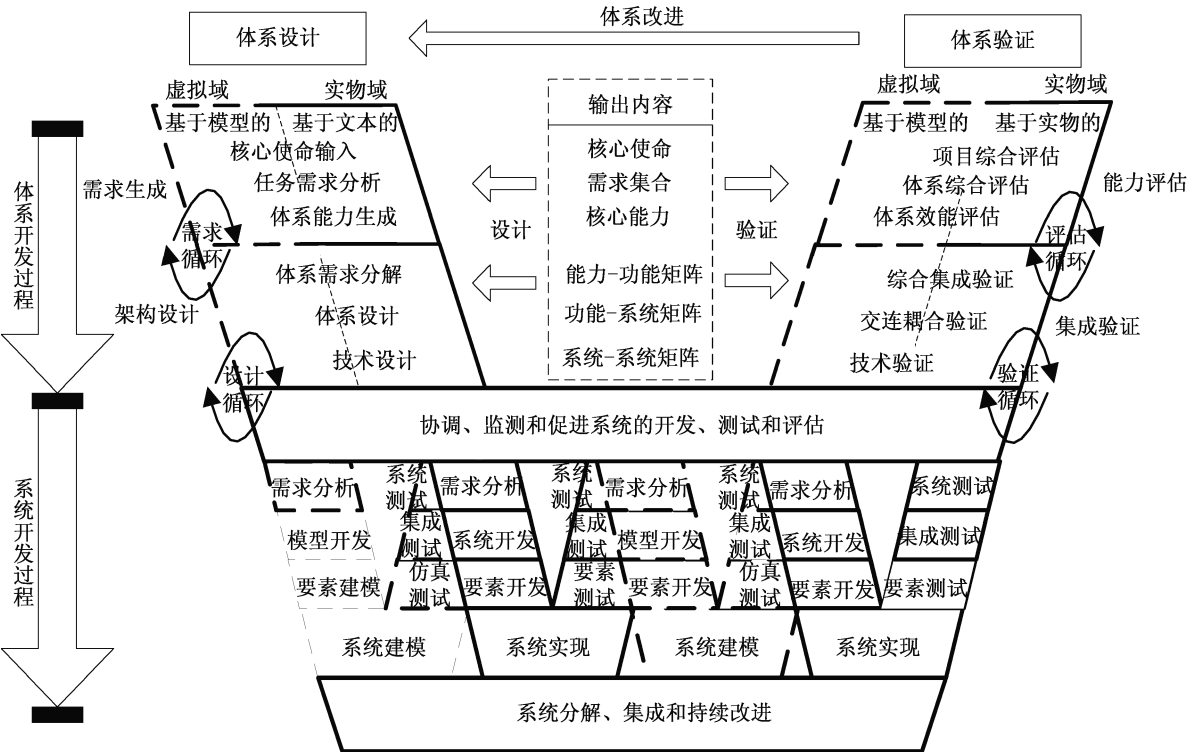


图 3 体系工程的过程模型

路；基于评估效果提出的能力改进方向将作为后续持续优化的输入，作为体系项目组合的优化阶段。

体系工程需遵循两个原则：流程贯通与数据驱动。流程是完成体系使命任务时各系统的耦合方式，体系各成员系统在技术和管理上进行交互与协作的过程，是体系状态转变的内在驱动力。流程是体系构建过程中的“纲”，流程设计时需要考虑合理性、高效性和安全性。数据是获取能力需求的来源，是构建模型的基础，是流程优化的依据，是体系仿真的驱动源，数据驱动了整体体系构建和体系演化过程。为实现快速仿真，需要有统一的数据模型驱动和支持。基于云架构实现资源（流程、工具、数据、模型、知识）的整合，利用组件化、大数据、人工智能等技术形成公共资源和服务，将研发不同阶段需要的工具、资源、数据形成一个有效的整体，打通每个单位、部门研制过程中内部管理活动与工程化之间的各个环节，营造跨部门、跨专业的分布式、协同化工作

环境，以实现体系工程真正落地。

2.2 体系工程的基本程序

2.2.1 体系需求生成

体系需求生成是指通过对体系与外界交互情况的综合研判和体系核心使命任务的逐层分解，映射出体系核心能力需求的过程，包含体系核心使命的生成、体系需求集合的生成、体系核心能力的生成三个子步骤。系统是实现功能，体系是形成能力，因此，体系需求生成的最终成果是形成体系的核心能力。主要采取环境集成研讨分析法、架构分解法、映射溯源分析法等方法。

（1）体系核心使命的生成。外部环境条件、协同制约因素、顶层战略意图、内部环境资源的综合研判分析决定了体系的核心使命。综合研判过程中，应在时空动态演化的角度，充分考虑外界与开放体系间的能量、信息交互，以及在交互中产生的涌现效应或制约条件，做到审时度势，高瞻远瞩。

(2) 体系需求集合的生成。对体系完成核心使命的全过程进行完备的描述,包括任务概念、任务完成要求、任务节点定义、节点间的能力协同与制约、信息域交互、任务实现过程等;对任务的实现作出评估,包括任务可行性分析、完成效果预计、资源消耗要求、失败代价等;通过对上述信息进行分解、整合,输出体系任务需求集合。

(3) 体系核心能力的生成。基于体系任务需求集合和经验、知识,设计能力指标定义,明确能力指标的任务溯源关系,明确能力指标要求和能力实现条件,输出体系核心能力需求。分析现有能力与需求间的差距以及实现能力需求的可能性。

2.2.2 体系架构设计

该阶段最终目标是对各系统提出研制的初步要求。通过对体系核心能力的逐层分解,设计出最适合实现能力集合的系统和系统间的交联关系。采取基于时空演进的分析方法和能力到系统分解映射的矩阵分析法,以流程为主线,随着体系运行流程的时空演进,进行逐点推进式的分析演进。

(1) 体系需求分析。目标是分析体系具备的功能的集合,通过从体系能力到体系功能的映射机制,形成体系功能群。构建能力—功能矩阵,分析体系能够实现的若干个能力,有多少个功能来支撑这个能力。

(2) 体系设计。针对若干个功能,把功能规划为若干个系统,一个系统可能实现若干个功能,也可能一个功能需要若干个系统,把这些功能全部规划分解到各个系统里。只要规划分解科学合理,通过一个系统,或多个系统联动,所有功能都能实现。该阶段的成果就是功能-系统矩阵,即体系构成系统的分解表。若干个系统,对每个系统技术上有约束,指标上有要求,形成一定的标准。

(3) 技术设计。明确各系统研制的要求,确保实现各系统独立或协同的目标。该阶段的成果

是系统-系统矩阵,通过对照分析,来找到体系随时空演进对系统提出的要求,以及系统和系统之间交联耦合的技术特征,明确相关的技术要求,建立相关的技术标准。

2.2.3 系统开发

基于系统工程方法论,综合多种专业技术,通过分析-综合-试验的反复迭代过程,对体系的各组分系统进行新研、沿用或改进,最终形成实物产品,以满足体系能力对各系统的功能需求和交联耦合需求。系统开发采取虚实结合的手段,通过系统建模与体系架构设计、集成间的多轮迭代确定体系优化方案,指导实物系统的分解和集成过程,降低迭代成本。

2.2.4 集成验证

体系集成验证包含技术验证、系统交联耦合以及体系整体验证三个层次,利用数字集成、半实物集成、实装集成等方法,对各组成要素内部的互联、互通、互操作能力以及体系的运行进行综合集成验证。

(1) 技术验证。在真实或接近真实的体系实施环境下,对一项新的技术或多项新技术的可行性、应用前景进行试验验证,为体系工程发展提供技术基础,降低体系工程风险。验证的内容可以是设计方法、计算技术、制造方法、材料或控制、测试技术等。

(2) 系统间交联耦合验证。以体系为对象,对各组成要素内部的互联、互通、互操作能力开展集成试验验证,主要包括共用基础和通用功能两部分:共用基础领域主要指共用信息服务平台,要通过平台上构建的“人、机、物”三元典型应用,验证各类通信与信息交换手段的互联、互通和对各类应用的互操作支撑;通用功能领域主要指体系内各组成系统的互联、互通、互操作能力。

(3) 集成验证。体系集成验证是从核心能力实现的角度,按照体系建设方案,验证体系运行的流程、体系能力的实现以及体系可靠性等内容。

2.2.5 能力评估

体系能力评估是以大系统的联合演练为基础进行的综合评估活动。评估过程以体系整体为研究对象,以运筹分析方法和系统分析方法为理论基础,采用统计评估、运筹分析、模拟仿真、实装演练等技术手段,通过定性分析和定量评估相结合的方式评估体系建设规划、体系运用以及组成系统发展中的重难点问题,为提升体系能力目标和体系的后续改进提供有益的决策参考。

2.3 体系工程程序实践

中国航天科技集团有限公司依据体系工程螺旋演进正向闭环迭代的建设理念,围绕“需求生成-体系设计-系统开发-集成验证-能力评估”五步程序,依托重大工程项目和主要方向领域建设需求,重点研究航天装备体系的基础应用场景、能力需求框架、体系总体架构,提炼共性体系要素,结合验证评估手段,不断拓展航天装备体系能力需求清单,推动航天装备体系总体架构持续迭代优化。

2.3.1 需求生成

首先,按照“承接细化、核心先行、整体设计”原则,设计航天装备体系应用场景。承接军事需求等权威输入,充分发挥装备技术驱动装备应用概念创新作用,构建航天装备体系应用场景集,为开展多领域航天装备体系能力需求生成和体系集成验证提供输入条件。其次,依据航天装备体系应用场景,按照“使命目标-任务需求-能力需求”逐级分解,生成装备体系的能力需求,为装备体系总体架构设计与优化提供依据。

2.3.2 体系设计

按照“应用场景设计-体系能力需求-装备体系架构-单项装备研制”正向设计思路,采用“问题分析域、认知解构域、架构设计域”迭代分析方法,以及“系统设计线-技术分析线”的双基线研究模式,设计航天装备体系总体架构,为航天装备体系建设提供指导。

2.3.3 系统开发

按照“平台系列化、载荷通用化、功能模块化”的主要工作思路,考虑装备研制技术驱动作用,系统分析装备的平台、关键分系统/重要单机、载荷的现状与发展情况,明确技术状态基线(基本型),确立装备“三化”设计要求,形成“五个一”:一系列工程方法、一系列技术文件、一套标准规范、一套集成验证平行系统、一套模型数据。

2.3.4 集成验证

集成验证工作依托顶层装备体系基础环境,重点开展基于信息系统顶层设计成果的共性领域能力集成试验验证、基于典型场景的多领域体系集成试验验证。共性领域能力集成试验验证以信息系统为试验对象,针对各组成要素内部的互联、互通、互操作能力开展集成试验验证。多领域体系集成试验验证以航天装备体系为试验对象,依据顶层架构和领域架构,设计适应该典型应用场景的解决方案级架构,制定形成体系试验框架,形成对接上级体系架构、领域架构和体制标准的闭环检验。

2.3.5 能力评估

以航天装备体系工程建设为评估对象,着眼形成体系研究链路闭环和迭代推进,通过开展体系标准综合评估、装备体系需求评估、装备体系构建评估、装备体系效能评估、重大装备项目评估和体系项目管理评估来检验体系能力需求匹配度、验证体系设计的合理性、审查贯彻体系要求的正确性、考核体系能力的有效性、度量典型装备的贡献率、把控体系项目的风险进度,提出装备体系构建指导,统筹推进装备体系集成,加速应用能力形成。

3 航天体系工程管理模型

国内外多领域的实践证明,刚性、机械的工程管理模式难以有效应对体系问题,体系工程需建立新的治理机制,组织、指导、协调、规范、监督使命共同体进行能力建设和能力运用,

推动体系持续演进，实现预期塑造效果。治理的依据是指南规范，引导性要求较多，提倡柔性的“治理”，而非刚性的“控制”。基于此，将体系工程的管理主要分为体系级和系统级两个层次，而体系级又细分为体系治理和过程管理，如图4所示。

3.1 组织架构

美国国防部体系系统工程指南指出，大多数体系工程都创建了跨体系系统工程理事会，且体系工程团队可能在集成产品团队或关键系统构型委员会中设立代表人；在项目组合领域同样也存在着项目组合管理办公室（PMO）这一组织结构，其通常具备管理项目原则章程、框架和方法论，评估项目组合绩效，进行资源投资和优先级决策，以及协调监督控制项目组合组分的职责。

基于上述理论与实践经验，确定相应的体系级项目管理办公室为组织管理机构，作为体系项目负责人（或称总指挥）的办事机构，直接对其负责；构建体系级技术域的实体或虚拟管理机构，支撑体系级技术负责人（或称总设计师）的技术

规划、评审等管理活动以及进行体系级技术平台搭建、仿真环境统一、对接上级需求等活动，而体系级技术负责人最终对项目负责人负责。

系统级项目的管理组织与单项目并无明显差别，只是可能在某些特定体系级全职或兼职代表人的组织下，与体系总体开展技术和项目维度的协调对接，并接受监督。

3.2 管理层次

鉴于体系工程的科学技术密集性和复杂性特点，类似于中国航天的两条指挥线模式，将体系工程的各管理层次分别划分为技术领域和项目领域。技术的实现是项目管理的最终目标并需要资源调度，项目的实现需要技术的高效管理支撑。

3.2.1 体系治理

体系治理是面向体系工程实施主体的基本原则和价值观框架，通过管理体制和运行机制的构建，以及协同环境的维护和技术平台的搭建，实现组织间接口的明确、业务间接口的规范、模型语言的统一、协同效率的优化和矛盾冲突的解决。管理体制聚焦于构建科学的制度体系、优化使命

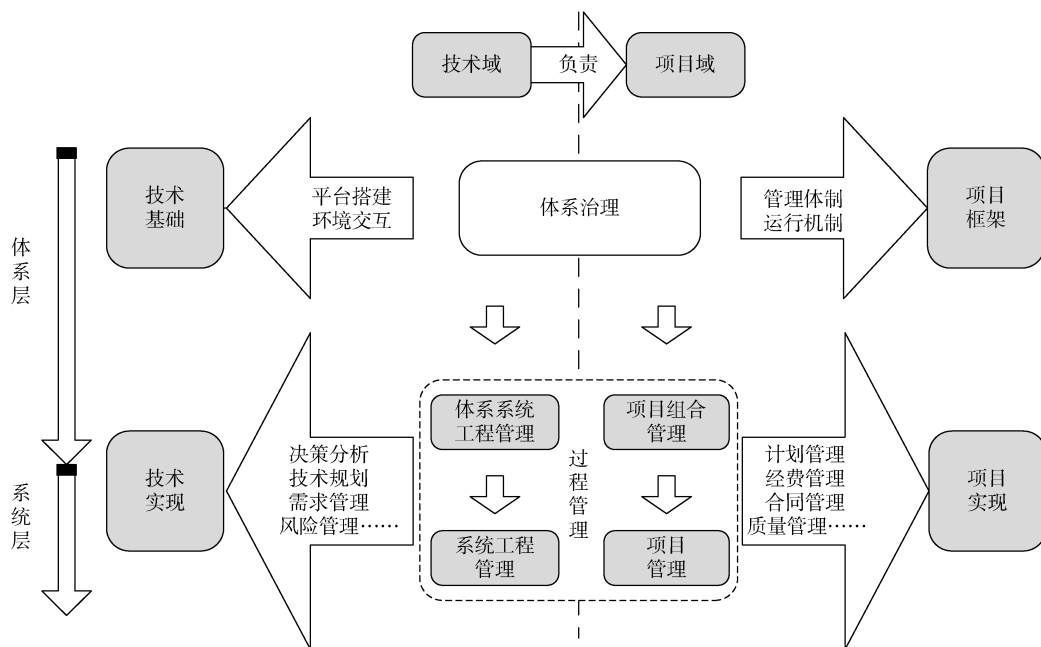


图4 体系工程管理模型

共同体的组织结构以及凝练宣贯组织文化和价值观;运行机制聚焦于构建科学的决策方法和流程、有效的利益协调手段以及高效的协同机制;环境维护聚焦于本体系对平级体系或上级体系作出适应,确定与外部协同的标准规范,支撑管理活动;平台搭建聚焦于通过对仿真、评估、协同等平台的搭建、维护和有效管理,提升管理效率。

体系工程规划论证阶段的管理,以体系的治理活动为主。将管理体制和运行机制信息凝练至项目组合章程中,便于项目成员的理解领会;将各类平台和环境交互标准集成至模型数据标准库,便于项目成员间以及与技术协同。在后续阶段,体系级项目管理部门需对各组分系统对章程的执行情况进行监控,并不断地引导改进。

3.2.2 体系工程过程管理

体系工程过程管理包括体系系统工程管理和项目组合管理两个方面。体系系统工程管理侧重于体系级技术实现的过程管理,涵盖体系技术规划、技术评估、需求管理、质量与可靠性管理、风险管理、数据管理、接口管理等方面,主要包括对指导推进体系总体设计成果的落地、对体系研究成果正确性进行技术审查、对体系工程间的工作界面和接口关系进行有效控制、定期对体系工程进行阶段性验证评估与督导检查等内容。项目组合管理侧重于管理主体对于有限资源的项目间协调过程,涵盖多个项目的计划、经费、进度、质量、合同等要素的统筹管理,包含规划、监督、评估、促进等活动,根据设计目标、现实差距以及资源条件实施滚动规划计划,优选项目实施,使结果尽量满足设计目标和任务需求。

体系工程规划论证阶段的过程管理主要以体系级总体小回路的技术管理为主,最终需要明确项目组合的选择;方案论证阶段过程管理应要求组分系统的系统工程师参与体系系统工程流程的各项事务,主要目的是制定项目组合的具体实施计划,并明确各组分系统的具体要求、资源配置、

优先排序、具体职能等内容,其管理方式仍以技术管理为主;在执行阶段,项目组合管理和体系系统工程管理并行,针对各组分不同的时间表,制定若干“公交站式”里程碑的时间窗口以协调体系活动,并综合统筹协调各系统项目的计划、经费、进度等方面,甚至适时调整各系统的优先排序,确保既有或优化组分在项目约束条件下交付;在优化阶段,通过回顾体系工程的全过程技术和管理活动,为余下项目组合的执行提供指导意见,达成治理效果。

3.2.3 系统工程过程管理

系统层的管理可称为系统工程的过程管理,即以各系统实施主体为管理主体,在已有的体系工程基本框架内,以系统实现为目标开展的项目管理和技术管理。与固有系统工程略有区别的是,系统工程过程管理需在体系构建初期就通过深入的技术仿真、交底和资源需求论证,深度参与项目组合的选择与优化过程。在体系工程的实施过程中,接受体系各级项目管理部门的协调、监督、评估等管理活动,并基于这些管理活动对本系统的开发作出适应性调整。

4 思考与建议

中国航天事业进入新的发展时期,传统系统工程面临着许多未曾出现的新问题、新挑战,解决这些问题需要以体系工程理论为指导,加快推进航天体系工程的系统研究,为航天事业高质量、高效率、高效益发展提供坚实的支撑。

4.1 树立和强化体系工程思维

体系工程认识论体现在工程项目主体对工程管理客体的反映,是一个“感性具体—抽象分析—理性具体”的逻辑演进过程,这一过程严格遵守否定之否定的辩证规律,需要经历“实践—认识—再实践—再认识”的螺旋式演进过程,需要强化四种思维方式。

一是强化整体思维,把体系作为多方面联系

的动态整体来加以研究,牢固树立全局观念和“一盘棋”思想,一切从体系整体及其全过程出发,处理好整体与局部的关系,以整体解决方案思维去分析思考体系问题,从体系整体和长远发展的角度,进行分析、决策、实施,确保整个体系处于最优组合的状态。

二是强化结构思维,以便对体系工程的认知层层解构,即在认识体系工程时,注意体系内部的机构性,体系由各系统组成,系统之间的组合是否合理,是否能够构成有机的联系,对体系而言至关重要,从结构出发研究体系问题能够确保思维清晰、有条不紊,有效减少问题的产生。

三是强化要素思维,每一个体系都由纷繁的因素构成,其中相对重要的因素视为构成要素,若要整体体系正常运转或处于理想状态,必须对各要素进行充分、全面的思考,使各要素组合起来能够发挥最大作用。

四是强化功能思维,即为了使一个体系呈现出最佳态势,需站在全局的角度来调整或是改变体系内部各部分的功能与作用,这一过程有可能会优化所有功能,亦有可能为了体系的整体优化而牺牲个别部分的功能。

4.2 构建和发展体系工程管理理论

一是依托产学研合作,加强理论研究,提升对体系工程的科学认识水平,以国家需求为牵引,从战略层面解构战略任务规划以及各利益相关者参与体系的能力需求;在实施层面,围绕整个体系工程核心,从体系设计、系统开发、集成验证、能力评估等环节出发,系统研究体系工程理论,构建一套完备的体系工程理论框架、知识体系,从而带动体系工程前沿理论、方法、工具的长远发展。

二是理论联系实际,作为工程性技术学科的特殊性,以航天装备体系工程实践过程中的现实问题为牵引,通过大量的工程实践来促进基础理论的实用化,不断丰富体系工程的理论体系。

三是大力推进大数据、人工智能等先进技术融合,瞄准航天体系工程实现面临的关键问题,大胆预测、瞄准前沿、提前部署、主动作为,展开相关研究工作,进一步完善体系工程技术体系。

4.3 引导和优化体系工程生态

航天企业作为联结国家意志和市场机制的桥梁,引入市场机制,积极探索新型合作模式,依托已有的航天技术和专业优势,将航天科研生产体系融入全国的科技工业体系,牵引构建由多元主体构成、具有多层次协作关系的新时期航天体系工程生态体系;并以解决体系问题、突破技术瓶颈、完成工程研制为目的,通过资源共享、优势互补、风险共担,协同实现所有体系工程主体合作共生;通过深入挖掘和全面整合资源,联合军、民、商等多元主体,实现体系工程需求生成、体系架构、标准规范的优化管理,依托航天体系工程生态体系,形成开放、包容、合作、共赢的体系工程技术与管理的创新策源地。

4.4 建树和培育体系工程人才专业化队伍

以当前和今后一段时期航天体系工程建设、管理所面临的重大任务和重大现实问题为牵引,以价值创造者为本,加强体系工程人才队伍建设。重点培养领军人才、专业人才、管理人才以及跨学科、交叉学科复合型人才。不断强化各类人才的适应能力、创新能力、统筹能力以及协调能力。一是强化制度创新,打通各类人才职业发展通道。二是强化创新实践,推动各类人才快速成长。三是联合外部创新资源联合塑造人才。四是以创新能力为导向,构建各类人才评价选拔体系。

5 结语

面对新时期航天事业发展的新机遇,针对装备体系化发展带来的新挑战,以传统航天工程实践为基础,以体系工程理论为指导,设计航天装备体系工程过程与技术步骤,拓展体系工程科学

理论、技术和工具, 提出加快推进航天体系工程管理的思考与建议, 为新时期航天装备体系的实现以及航天事业的产业化发展奠定了坚实的理論、技术、工程和管理基础。

参考文献

- [1] 冯·贝塔朗菲. 一般系统论: 基础、发展和应用[M]. 林康义, 魏宏森, 译. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [2] Prigogine I. Structure, Dissipation and Life[C]//Center for Statistical Mechanics and Complex Systems, 1969.
- [3] Haken H. Synergetics an Introduction[M]. Berlin: Springer Verlag, 1983.
- [4] 托姆. 结构稳定性与形态发生学[M]. 成都: 四川教育出版社, 1992.
- [5] 洛伦兹 E N. 混沌的本质[M]. 刘式达, 译. 北京: 气象出版社, 1997.
- [6] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术: 系统工程[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 520-525.
- [7] DoD. System of Systems Engineering, In Defense Acquisition Guidebook[R]. Department of Defense, 2004.
- [8] Jamshidi M. System of Systems Engineering: Innovations for the 21st Century [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [9] 顾基发. 系统工程新发展: 体系[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 10-19.
- [10] 游光荣, 孙晓, 王继民, 等. 国内体系工程研究态势分析与发展建议[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(6): 583-592.
- [11] 陈文英, 张兵志, 谭跃进, 等. 基于体系工程的武器装备体系需求论证[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(12): 2479-2484.
- [12] 任天助, 辛万青, 严晔隼, 等. 体系工程研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(6): 102-107.
- [13] 叶振信, 宁雷, 李芳. 系统工程实践下对装备体系工程建设的思考[J]. 中国航天, 2021(5): 57-61.
- [14] 张最良, 黄谦, 李露阳. 体系开发规律和科学途径[J]. 中国科学基金, 2006, 20(3): 159-163.
- [15] 张维明, 修保新. 体系工程问题研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(5): 451-456.
- [16] 陈英武, 姜江. 关于体系及体系工程[J]. 国防科技, 2008, 29(5): 30-35.
- [17] 武志锋, 刘伊生. 基于体系工程的重大科技项目决策博弈分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(7): 684-691.
- [18] 岳增坤, 陈炜, 夏学知. 基于 DODAF 的体系结构模型设计与验证[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1407-1411, 1415.
- [19] 黄小华. 基于体系工程的无人机系统建模设计[J]. 遥测遥控, 2018, 39(3): 21-28.
- [20] 张霖, 王昆玉, 赖李媛君, 等. 基于建模仿真的体系工程[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 179-190.
- [21] 李小波, 林木, 束哲, 等. 体系贡献率能效综合评估方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 4520-4528, 4535.
- [22] Laurentis D D, Fry D, Sindiy O, et al. Modeling Framework and Lexicon for System-of-Systems Problems[C]//IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2006.

Aerospace System Engineering Model in the New Era

Li Minghua

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100068, China)

Abstract: In the face of emerging opportunities of building a space power, the new challenges of complex international situations, and the new requirements put forward by the development of information technology to the modernization of national defense and the army, aerospace equipment presents a systematic development trend and requires that the theories and management methods guiding system engineering must change and follow the trend. By summarizing and judging the current research status of system engineering at home and abroad, based on the practice of aerospace system engineering, this paper designs a dynamic evolution process of system engineering, constructs the evolution, process and management model of system engineering, and puts forward some suggestions for further optimization of the practice of system engineering to provide reference for solving complex system engineering problems and enriching the theory of system engineering.

Key Words: aerospace; evolution model; process model; management model