



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486,CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目： 面向总体设计的体系工程：技术现状、研究框架与发展方向
作者： 李小波，梁浩哲，黄智捷，王泊涵，李静晶，闫玉铎，明梦君，朱智，陈子夷，王涛，王维平
收稿日期： 2025-09-04
网络首发日期： 2025-12-17
引用格式： 李小波，梁浩哲，黄智捷，王泊涵，李静晶，闫玉铎，明梦君，朱智，陈子夷，王涛，王维平. 面向总体设计的体系工程：技术现状、研究框架与发展方向[J/OL]. 国防科技大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20251217.1318.003>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.25090007

面向总体设计的体系工程：技术现状、研究框架与发展方向

李小波¹，梁浩哲²，黄智捷^{1*}，王泊涵³，李静晶¹，闫玉铎⁴，明梦君¹，朱智¹，陈子夷¹，王涛¹，王维平¹

(1.国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 军事科学院 系统工程研究院, 北京 100010; 3. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854; 4. 中国人民解放军 31002 部队, 北京 100094)

摘要：现代战争的体系对抗特征推动了体系工程研究的不断深入，使得中观层次面向具体使命任务的作战体系设计逐步成为体系工程的重点和难点领域。本文在系统总体设计和体系工程相关研究基础上，从技术现状、研究框架和发展方向三个方面展开研究。首先根据系统工程设计过程模型，从需求分析、方案设计、仿真实验、方案评估和方案优化五个方面梳理国内外技术现状，据此从知识领域和业务流程两个方面搭建面向总体设计的体系工程研究框架；最后结合相关前沿成果分析关键技术发展方向。论文系统总结了面向总体设计的体系工程框架与技术途径，有助于形成体系总体设计研究共同体，推动体系工程技术协同攻关。

关键词：体系工程、体系总体设计、总体设计部、设计过程模型、V字模型

中图分类号：TP391.9 文献标志码：A

System-of-systems engineering for general design: state of the art, research framework, and development directionsLI Xiaobo¹, LIANG Haozhe², HUANG Zhijie^{1*}, WANG Bohan³, LI Jingjing¹, YAN Yuduo⁴,
MING Mengjun¹, ZHU Zhi¹, CHEN Ziyi¹, WANG Tao¹, WANG Weiping¹

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. System Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100010, China; 3. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; 4. The PLA Unit 31002, Beijing 100094, China)

收稿日期：2025-09-04**基金项目：**国家自然科学基金资助项目(72471234)；国家部委基金资助项目(JCKY2022204A001)**第一作者：**李小波(1983—)，男，湖南衡阳人，副教授，博士，硕士生导师，E-mail: lixiaobo@nudt.edu.cn***通信作者：**黄智捷(1989—)，男，湖南衡阳人，博士研究生，E-mail: huangzhijie@nudt.edu.cn**引用格式：**李小波，梁浩哲，黄智捷，等. 面向总体设计的体系工程：技术现状、研究框架与发展方向[J]. 国防科技大学学报.**Citation:** LI X B, LIANG H Z, HUANG Z J, et al. System-of-systems engineering for general design: state of the art, research framework, and development directions[J]. Journal of National University of Defense Technology,

Abstract: The SoS (system-of-systems) nature of modern warfare necessitate in-depth research into SoSE (system-of-systems engineering), gradually making the design of the operational SoS at the meso level, which is oriented towards specific mission tasks, a key and difficult area in SoSE. Drawing on foundational studies in system general design and SoSE, this paper explored through three dimensions: current state of the art, research frameworks, and future directions. First, based on the systems engineering design process model, domestic and international advances in SoSE technologies across five stages were reviewed and synthesized: requirements analysis, solution design, simulation experiments, alternative evaluation, and solution optimization. Building upon this review, a research framework for top-level SoSE design was constructed from the dual perspectives of knowledge domains and business workflow. Finally, the development trends through a synthesis of successful frontier fruits in related areas were examined. The research framework and technical approaches for SoSE oriented toward general design were systematically consolidated, contributing to the formation of a research community in SoS general design and fostering coordinated, collaborative advancement of related technologies.

Keywords: system of systems engineering, system of systems general design, general design department, design process model, V model

从二十世纪五十年代开始,体系逐步用于描述一类由独立组分系统组成,完成高于组分目标的全局目标的系统^[1]。进入二十一世纪以来,体系工程作为系统工程发展的新阶段^[2],在理解和解决复杂工程问题方面发挥着越来越重要的作用,尤其在军事领域得到了深入研究^[3,4]和广泛应用^[5]。从军事领域的理论研究脉络与实践应用现状来看,体系工程研究主要面向以下三个问题层次。

一是宏观层次面向规划的体系工程,以美军提出的联合能力集成与开发体制(joint capabilities integration and development system, JCIDS)为代表。JCIDS通过科学技术倡议(Initiatives)、规划设计预算体制(planning-programming-budgeting system, PPBS)、国防采办系统和实验四个方面的体制框架^[6],为军事力量的体系建设与发展提供战略性的政策指导。面向规划的体系工程研究与组织的战略目标及业务活动紧密相关,侧重在以联合作战体系能力需求牵引建设规划与产品集成,明确了支撑该体制的各相关实施部门的角色与职责,出台了配套的政策制度,并形成了相应的业务流程与支撑工具,是体系工程在宏观组织管理领域^[7]的典型应用。这类体系工程研究的重点是根据组织战略目标与能力需求进行联合作战概念开发,并以此为依据进行体系作战能力规划,但对于作战力量体系如何具体设计缺乏深入研究。

二是微观层次面向采办的体系工程,主要采用体系架构框架来对体系使命能力与作战活动进行分析,根据现有装备体系相对于作战活动和能力需求的缺陷,辨识具体项目的采办需求。该类研究典型的方法是基于美国国防部架构框架(department of defense architecture framework,

DoDAF)和CORE[®]工具的采办需求三阶分析^[8]:第一阶分析是基于DoDAF架构模型将作战视图映射到系统视图,第二阶分析是进行系统之间的接口映射,第三阶分析是通过基于CORE[®]的可执行架构分析,根据现有作战系统对于能力差距的满足程度,形成采办需求和项目投资方案。面向采办的体系工程研究根据功能性任务活动规定的的能力需求形成国防采办项目,作为JCIDS体制下国防采办项目落地的关键技术环节,是军工部门和国防采购管理部门体系工程研究的重点领域。但是,该类研究聚焦基于作战任务活动能力差距的采办项目需求分析,缺乏对于作战力量和作战体系的组织编制和指挥控制设计。

三是中观层次面向设计的体系工程,通过体系需求分析、方案设计、计算实验、方案评估、方案优化等五个方面来支撑具体体系的工程化开发。采办项目建设绩效需要融入作战系统和力量体系,进而构建作为战略能力承载的使命作战体系^[9],以支撑组织战略目标达成。由于能力规划与项目采办两个问题层次之间逻辑跨度大,难以直接建立关联支撑关系,需要开展面向设计的体系工程研究,衔接宏观层次和微观层次。美国国防部本世纪初就组织军工部门开展了包括体系设计、体系开发与集成、体系测试与验证为核心的体系工程过程与方法研究,用于未来作战系统(future combat systems, FCS)、先进作战管理系统、马赛克作战体系等项目研制^[10],并且在联合和军兵种层面出台了一系列体系工程指南^[11],用于指导军事力量的体系化设计与构建。尤其是近年来,美军通过使命任务工程^[12]、数字工程^[13]等一系列标准规范推进作战体系的工程化设计与实现。欧盟也越来越重视面向设计的体系工程研究,从2010年起设立专项资金资助一系列体系设

计相关的理论、方法、技术和工具研究项目，并且在交通、能源、赛博安全等领域初步应用，典型的项目有“体系工程适应性与演化性设计项目”（designing for adaptability and evolution in system of systems engineering, DANSE）^[14]、“先进体系综合建模（comprehensive modelling for advanced systems of systems, COMPASS）项目”^[15]。

从以上三个层次可以看出，体系工程的理论研究和应用实践不再局限于宏观层次的体系规划与微观层次的项目采办，正在向中观层次面向具体使命任务的作战体系设计与实现逐步扩展，三个层次之间交叉融合形成当前体系工程研究的有机整体。设计是系统工程的核心技术环节^[16]，中观层次的力量设计向上承接组织战略规划，向下驱动系统级项目建设与集成，是体系工程研究的核心领域，也是目前的难点问题。体系设计本身具备与传统系统设计不同的问题特点，面临着多能力要素领域融合^[17]、多异质系统集成^[18]、多权责部门系统协同^[19]等新的设计要求与挑战，这对面向设计的体系工程研究提出了新的挑战。

总体设计是钱学森结合中国工程实践特点提出的系统工程创举，总体设计技术与系统总体设计部制度在航天、航空等国防工业部门得到了深入研究和广泛应用，有力提升了我国工程系统设计水平^[20]。体系作战时代的来临及武器装备的体系化发展需求，催生了军事力量设计理念和方法进一步由系统总体设计向体系总体设计转变。本文借鉴系统总体设计^[21]的理论与实践，梳理形成面向总体设计的体系工程理论框架，推动系统工程界凝聚体系级总体设计共识，构建面向总体设计的体系工程系统性解决方案。本文后续章节安排如下：首先在分析体系总体设计问题定义与研究需求；接着以系统工程设计过程模型^[16]中的主要技术环节划分为基础，从需求分析、方案设计、仿真实验、方案评估、方案优化五个方面综述国内外体系工程技术研究现状；然后从知识领域和业务流程两个方面搭建了面向总体设计的体系工程研究框架；最后结合当前体系工程相关领域前沿技术和总体设计工程化落地需求，探讨体系总体设计的未来发展方向。

1 体系总体设计问题定义与研究需求

本节从组织情境下的作战体系内涵出发，阐明体系总体设计区别于传统系统设计的特征与难点，界定了体系总体设计的概念边界、提出了工程化研究框架的研究需求，体系总体设计的问题

分析思路如图 1 所示。

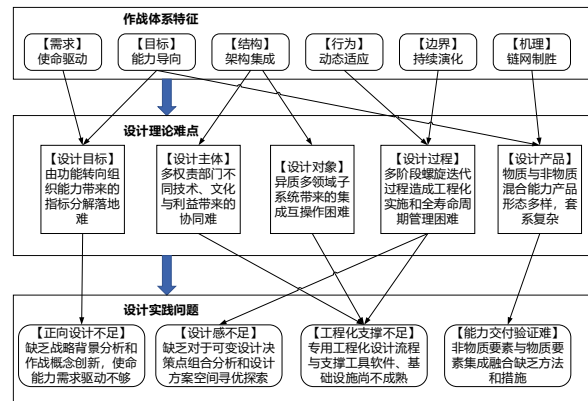


图 1 体系总体设计问题分析

Fig.1 Problem analysis of SoS general design

军队作为一类特殊的使命组织，一般具备多样化使命任务要求，军事领域的体系在军队组织情境下有其独特的内涵与特征。组织系统工程研究认为，体系是组织内部承载能力和实施任务的组件（component）^[14]，为组织级能力形成与运用提供集成化手段^[15]。在体系作战时代，体系是执行军队高层次使命任务的一类特殊军事力量组织^[17]，承载着组织级战略能力要求^[11]，一般称之为作战体系。军事领域的体系具备以下六个方面的特征：一是从需求角度看，体系强调组织使命（Mission）驱动设计空间构建与寻优，军事力量体系是军事组织实现其使命任务的方法和手段，军事力量体系建设和运用都围绕使命展开；二是从目标角度看，体系强调能力（Capability）导向，体系研究的核心目标是提供组织使命所需的能力集合，有学者甚至认为体系工程本质上是能力工程；三是从结构角度看，体系强调架构（Architecture）集成，作战体系组成要素可以从陆、海、空、天、网、电等作战领域和侦察、指控、打击、评估、保障、通信等作战功能两个维度进行划分，作战体系构建需要采取架构的方式对以上两个领域的组分要素进行有效集成；四是从行为角度看，体系强调动态适应（Adaptability），体系面临复杂动态的作战环境和对抗态势，需要根据战场态势变化迅速做出动态调整和敏捷响应，确保预期使命任务效果的达成；五是从边界角度看，体系强调持续演化（Evolution），体系的问题边界和组成结构始终在动态变化，能力需求、组成要素、接口协议和行为模式都处于长期的持续演化过程；六是从机理角度看，体系强调链网制胜，体系对抗本质上是观察—判断—决策—行动（observe—orient—decide—act, OODA）决策链路和侦、控、打、评作战行动链路及其构成的

链路网络对抗，链路网络占优和取胜就能获得体系作战的优势和胜利。

设计科学将设计的要素划分为：目标、主体、对象、过程和产品，设计主体根据设计目标，针对设计对象通过一系列设计活动过程形成设计产品^[22]。从军事体系的特征分析来看，体系与传统的系统以及复杂系统不同，体系设计面临新的问题和挑战。下面从设计科学的各个要素分析体系设计的难点问题：（1）从设计目标来看，体系强调组织使命驱动和作战能力导向，体系设计要从功能设计到组织能力设计转变，但是组织能力的牵涉要素多，生成机理复杂，设计目标的分解落地较为困难；（2）从设计主体来看，由于体系设计牵涉到不同的技术领域和权责部门，一般需要多个不同权责主体部门有效协作，这些部门通常横跨职能、技术领域和地域，甚至存在利益冲突，采用统一权威部门进行总体协调较为困难，部门之间的协作会受到各权责主体不同利益、组织文化背景和知识技术基础的挑战^[19]。（3）从设计对象来看，由于体系一般由多个领域的异质子系统组成，体系设计需要采用架构式综合集成设计，子系统之间的交互接口、集成规范较为复杂；（4）从设计过程来看，由于体系存在动态适应和长期演化，体系设计的过程不仅需要分为多个设计阶段以及不同技术环节，还需要针对需求、边界和结构的长期动态演化进行多阶段螺旋迭代优化设计，这对体系设计的工程化实施和全寿命周期管理带来了巨大挑战。（5）从设计产品来看，由于体系强调动态适应和链网制胜，体系设计方案最终交付的产品不仅仅是单一实物产品，而是需要交付成套的组织能力产品，既包括装备、设施等物质产品，还包括指战人员、战术战法、领导力等非物质产品，这些产品具备数字化、组织化等特性，造成产品形态多样，套系复杂。

由于仍缺乏应对以上设计难点问题的基础理论和工程技术框架，体系设计在工程实践中存在以下问题：一是由于缺乏体系所处的组织战略背景分析和作战概念创新，导致使命目标和能力需求驱动的正向设计能力不足；二是由于缺乏对于可变设计决策点组合的深入分析以及在此基础上的设计方案空间寻优探索，导致“设计感”不足；三是由于体系专用的量化、工程化流程及其支撑工具软件，以及知识体（body of knowledge）、数据库、案例库等尚处于研究和构建过程中，导致设计的工程化支撑基础设施不成体系、成熟度不够；四是由于当前体系设计以装备、技术、设

施等物质产品为主要产品形式，缺乏如何将人员、组织、训练、战术、指挥艺术等非物质因素融入作战力量体系的方法和措施，导致体系设计产品的作战能力验证与交付较为困难。

系统总体设计是根据用户的特定任务要求，对系统功能和总体技术指标进行综合论证，设计系统总体方案及其技术实现路径，并且确定各分系统的研制技术要求和集成方案，牵头组织产品组件开发与集成试验^[21]。90年代以来，以钱学森为首的国内系统工程研究人员提出倡议，借鉴系统总体设计部的思想和成功经验，在国家层面研究国家级总体设计技术并建设国家总体设计部，认为总体设计能够在更高层面上创新设计技术、提升设计水平，为决策服务^[22]。因此，总体设计以及总体设计部已经在宏观层次面向战略规划问题和微观层次面向系统研发问题得到了应用，但是对于体系总体设计仍缺乏明确的概念定义。

借鉴系统总体设计的相关概念，军事领域体系总体设计的概念内涵为：根据军事组织的战略目标和使命任务要求，构设体系作战概念并分析体系作战能力需求，对军事力量体系能力和总体战术、技术指标进行综合论证，设计包括构型配置、组分系统与接口、行为模式与机制、制胜机理与演化规律等方面的体系架构方案及其技术实现路径，确定各组分系统的研制技术要求，并且组织开展体系原型开发与集成试验。体系总体设计向上承接战略总体设计，向下驱动系统总体设计。与系统总体设计类似，体系总体设计是一个技术过程，也是一个管理过程^[20]，应当成立专门部门——体系级总体设计部^[23]进行技术研发和过程管理。

针对以上体系设计难点问题，根据体系总体设计的概念内涵，下面在技术现状综述的基础上搭建面向总体设计的体系工程研究框架，为体系总体设计问题的系统性技术与组织解决方案提供理论指导，进一步推动体系总体设计的研究合力和实践协作。

2 技术现状综述

系统工程设计过程模型^[16]将工程系统设计过程分为需求分析、方案设计、仿真实验、方案评估、方案优化五个互相衔接的技术环节，如图2所示，本节根据体系总体设计的研究需求，对国内外相关体系工程研究现状进行综述分析。

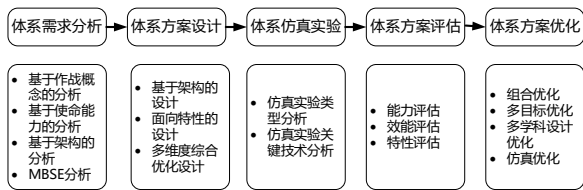


图2 面向总体设计的体系工程技术现状

Fig.2 State of the art of SoSE for general design

2.1 体系需求分析技术现状

体系需求与系统需求不同，除了在范围、规模和数量上的复杂性增长之外，主要体现在以下几个方面^[24]：1) 体系需求以组织战略目标牵引下的使命能力为核心，而非系统层的功能，能力的设计、生成与运用，以及发挥作用都需要在一系列作战概念和场景下通过完成系列任务的本领来考察，具备较强的组织情境依赖，相对于系统行为与功能需求之间较为直接和明显的关系而言更为复杂。2) 体系需求具备可变性和演化性^[25]，一方面，由于体系生命周期较长，用户的要求和运作环境存在较大的可变性，体系的需求长期来看存在演化可变性；另一方面，从短期来看，体系需求还要具备一定的敏捷适应性，体系在全生命周期中的各个阶段对于需求进行闭环校验、验证和迭代优化，以确保体系需求的正确性和可行性。3) 体系需求具备多部门、多领域和多子系统复合特性，这些特性不仅由于复杂交互产生涌现等整体特性，从而使得组件、领域、组分之间的需求关系分为整体和局部层次，并且由于相互之间的利益冲突和互斥性产生需求的不一致性。体系需求分析的复杂性为传统系统领域的需求工程理论与方法提出了挑战，体系工程界认为需要提出新的需求分析方法以应对这种挑战^[24]。针对以上问题复杂性，体系需求分析方法和技术的研究主要分为以下几类：

(1) 基于作战概念的需求分析

作战概念建模属于概念设计的重要组成部分，能够承载军事需求用户方的核心需求，作为军事需求最重要的来源和依据。体系需求分析不局限于需求分析技术，还需要采用体系作战概念的建构和推演^[26]，开展体系作战运用理念和构想的创新性预设，将作战概念中的使命任务线程落实到体系作战任务活动，然后将使命能力与效能指标要求分解落地为体系设计能力需求。依据战争设计工程和装备需求论证工程化思想，采用具体的构想、场景来对体系的作战概念与目标图像进行模型化描述，有助于体系用户和设计人员进

行作战概念的协同分析和有效的沟通。

(2) 基于使命能力的需求分析

使命能力需求分析是体系需求分析的核心内容，当前大部分体系需求分析研究针对体系使命能力需求以及体系组分系统功能需求组成的需求集合。美军使命任务工程认为：传统系统工程专注于系统实施，而使命任务工程将重点转向使命能力的实施和集成^[12]。使命任务工程通过对使命任务进行形式化建模、量化分析，并将使命任务需求作为体系要素集成的指南和规范，已经成为美军体系需求分析的重要指导方法和工程化手段。使命任务在体系研究中有着重要的驱动的作用，有的学者甚至认为可以采用使命驱动的体系设计方法。基于使命能力的需求分析典型方法有基于能力需求的概念设计与验证，基于作战元活动——能力规则的使命能力需求分析，基于战略环境的体系作战需求分析，基于系统工程“V”模型和用户故事思想的作战体系能力需求敏捷开发^[27]，基于多层次任务分解与基元作战能力匹配的联合作战需求描述。

基于作战概念与基于使命能力两种方法存在交叉和承接关系。一般来说，能力需求分析可以从作战概念给出的任务活动的能力和功能需求中进行能力差距分析得到。但是，这两种方法还是有着本质上的区别和侧重点。作战概念侧重在概念层次对于体系未来作战场景和目标图像的构建，即将来需要打什么仗，把这个问题搞清楚以后，能够阐明要打这样的仗需要什么样的体系以及什么样的体系作战能力。因此该方法是在体系概念设计和目标图像构建中，捕获实现这个概念或者目标图像的需求；也就是说，作战概念是体系需求识别和捕获的基础载体，而且强调的是从具体的体系作战场景和构想这种动态的行为特征与效果需求中进行需求分析。但是需要说明的是，作战概念并非唯一的能力需求载体，也可以采用其它方法，例如静态的体系架构建模和能力指标树分解方法。基于使命能力的需求分析则侧重从体系需要达到什么样的能力目标来确定，具有更强的输入指导，但是单纯的能力需求可以不考虑或者忽略对抗过程的影响，把动态的体系博弈对抗转换为静态的能力/功能需求指标。

(3) 基于架构的需求分析

体系工程要求对每个阶段的产品进行模型化、规范化描述，从而能够支持工程化的开发。在需求分析阶段，采用体系架构对体系需求描述进行模型化描述的方法较为常见。一方面，体系

架构中包含了有关需求的视点或者视图,例如,采用 DoDAF 的能力视点和系列视图进行体系需求描述^[28],采用系统建模语言(systems modeling language, SysML)的需求视图进行体系需求描述^[29]。另一方面,需求视点模型作为架构模型的一部分,能够与作战活动(例如 DoDAF 的作战视图)、装备系统(例如 DoDAF 的系统视图)等其它架构要素建立映射或者追溯关系,从而能够增强需求的整体性和追溯性。由于体系需求分析相对于系统需求分析的特殊性,有学者聚焦体系整体特性的架构化描述,从体系架构的不同视角中抽取元需求并进行视图改进,例如针对涌现、演化等特征进行元需求描述^[30]。此外,有学者提出了一种基于能力需求进行武器装备体系结构建模的思想,将体系结构建模框架分为四部分,其中第一部分是“从需求到体系结构的建模”,反映如何从体系能力需求逐步构建武器装备体系结构的过程^[31]。

(4) 基于模型的系统工程(model-based systems engineering, MBSE)的需求分析

基于模型的系统工程已经在系统级产品研发中得到了广泛应用,也在系统需求分析中发挥了重要作用,不仅能够采用规范化、形式化、工程化方式描述系统需求描述,从而促进各利益攸关者(或者称为权责主体,英文为 Stakeholder)的有效沟通,还能够通过模型转换和模型驱动的开发方式实现需求模型向设计模型的传递,从而实现跨阶段模型连续性和需求可追溯性^[32]。但是,目前,体系级 MBSE 的理论研究和应用都较为缺乏,尤其是体系级模型由于规模和复杂性增加为模型转换生成的效率和准确性带来巨大挑战。采用模型驱动的工程技术和知识推理的方法^[33]将架构模型和 MBSE 技术结合起来的研究是一条可行的路径。

2.2 体系方案设计技术现状

体系方案设计是体系总体设计的核心环节,DeLaurentis 等人早在 2005 年就根据体系的组分系统类型、组分自治性和组分连接强度对体系设计方法进行了分类^[34]。从整体上来看,基于架构的设计仍然是体系方案设计研究的主要方法,但是越来越多的学者开始关注体系和复杂系统相对于传统系统的特性(例如涌现性、演化性和适应性)为体系方案设计带来的挑战,开展面向特性的设计;此外,在体系架构多视图设计理念的基础上,体系工程界要开展多领域、多子系统的定

量化综合设计。本节重点从以上三个方面进行现状综述分析。需要说明的是,从设计过程的工程化闭环来看,广义的体系设方案设计包括设计方案的校核验证与解析分析,设计方案空间生成与寻优探索,以及设计方案仿真评估与优化等技术领域。这些广义上的设计研究体现了设计在体系工程研究中的核心地位。本节主要关注与设计密切相关的技术环节,其它主要与仿真实验、评估优化技术相关的内容则放到后续小节探讨。

(1) 基于架构的体系方案设计

由于体系的动态性,组成体系的各个异质组分能够动态加入和退出,并且组分之间的耦合关系是松散的,一般通过各种协议和接口进行动态组合,这为静态的系统结构设计方法带来巨大挑战。此外,体系方案设计不仅要应对组成要素的异质和多元化,还要求有效表达各个利益攸关者的利益关切,为多部门权责主体的有效协作提供公共设计基础设施支撑。基于架构的体系设计采用多个视图为各个权责主体提供友好的设计界面,为体系的组成结构、行为模式和演化规则提供集成的统一视图。体系架构决定了体系的结构形式、交互接口、行为机理和演化规律,为多元化异质组分的松散动态耦合提供了集成机制,成为体系方案设计的主流方法。

当前基于架构的体系方案设计主要采用架构框架(即架构设计方法框架)进行,架构框架从顶层将体系设计的领域划分为视点(Viewpoint),在每个视点内设置一系列视图对该领域的设计问题和方案进行详细描述,并且通过元数据、元模型或者本体语义方法建立各个视图模型之间的关联关系,形成整体设计方案。体系架构设计不仅为设计人员提供了图形化建模语言和环境,通过对架构模型进行量化、语义化描述可以进行架构可执行分析和语义推理,并且可以将架构转换为 Petri 网等形式化分析方法,支持对架构设计方案进一步的定量分析,还可以通过架构驱动的仿真方法运用仿真实验对体系架构方案进行评估和优化^[35],形成了基于体系架构的技术方法框架。由于架构分析、评估、优化等技术属于体系仿真、体系评估、体系优化等技术领域,后续部分会专门探讨。本部分主要介绍体系的架构设计方法和语言,即架构框架。针对体系设计问题,典型的架构框架有以下三类。

一是国防采办领域提出的美国 DoDAF^[36],DoDAF 的前身是指挥、控制、通信、计算机、情报、监视与侦察(command, control,

communications, computers, intelligence, surveillance, and reconnaissance, C4ISR) 架构^[37], 与 DoDAF 类似的还有英国国防部架构框架 (british ministry of defense architecture framework, MoDAF)、北约架构框架 (NATO architecture framework, NAF)、联合架构框架 (unified architecture framework, UAF) 等架构框架^[38], 这类框架以系统视图、作战视图、技术视图为核心, 通过作战视图的功能性任务需求与系统视图的功能之间的匹配关系, 辨识能力差距, 基于能力差距产生采办需求^[39], 各类系统通过技术视图规定的标准和规范进行体系集成。随着架构框架理论研究和应用实践的不断深入, 这类框架正在根据不同的问题领域特征扩充其内涵, 并建立统一架构框架。UAF1.2 版支持建立国防领域采办统一架构, 兼容 DoDAF、MoDAF、NAF 等标准, 甚至能够运用系统工程建模语言 SysML 进行描述和分析, UAF 包括战略、能力、项目等新的视点, 能够对战略需求和体系对抗需求背景下的采办需求问题和解决方案进行全景式描述, 并且通过底层构建数据模型 (unified profile for DoDAF and MoDAF, UPDM) 和本体模型 (international defence enterprise architecture specification, ideas), 为体系多视图模型的统一数据集成和语义推理提供了技术基础, 目前在体系方案设计中受到了业界越来越多的关注^[40]。UAF 提供了基本的视点分类 (包括元数据、战略、作战、服务、人员、资源、安全、项目、标准、实际资源等) 和视图类型 (包括分类学、结构、关系、过程、状态、场景、信息、参数、约束、路线图、追溯性), 并且支持在基础视点和视图类型的基础上进行定制, 具备方法的可扩展性^[12]。但是, DoDAF、UAF 系列框架对于军事力量组织编制、指挥控制、战术战法等方面的描述能力比较弱, 没有设置专门的视点进行针对性设计与建模, 国内学者认为 DoDAF 用于我军体系架构设计会存在水土不服的情况, 除了配套制度规范和思维习惯方面的差异外, 将 DoDAF 用于力量体系设计时会缺乏组织指控设计视图和性能指标评估方面的支撑是主要原因^[41]。

二是系统工程领域提出的扎克曼框架 (Zachman Framework), Zachman 框架由 John Zachman 于 1987 年提出, 是最早的架构框架之一。它提供了一种结构化的方法来描述系统架构。扎克曼框架使用一个二维矩阵来表示企业架构的不同视角和细节层次。矩阵的行表示不同的利益

相关者 (如规划者、设计者、构建者等), 列表示不同的架构描述 (如数据、功能、网络等)。提供了一个全面的视图, 帮助组织从多个角度理解和管理体系架构^[42]。但是扎克曼架构框架本身不提供具体的实施方法, 需要结合其他方法论使用。

三是组织管理与设计领域提出的开放组织架构框架 (the open group architecture framework, ToGAF)^[43] 和美国联邦组织架构框架 (federal enterprise Architecture, FEA)^[44], ToGAF 主要内容包括组织的架构愿景、业务架构、信息系统架构、技术架构、架构治理与变更等, 能够对组织内部的业务流程、组织角色、支撑信息系统进行顶层设计和持续治理, 广泛应用于组织战略管理和信息系统架构开发, 形成架构螺旋渐进式开发方法论架构开发方法 (architecture development method, ADM)。ToGAF 提供专门的组织角色视点, 能够为作战体系的组织设计建模元素和视图建模方法。FEA 是由美国联邦政府开发的企业架构框架, 旨在提高政府部门之间的信息共享和协作。FEA 包括五个参考模型: 绩效参考模型 (performance reference model, PRM)、业务参考模型 (business reference model, BRM)、服务组件参考模型 (service component reference model, SRM)、技术参考模型 (technical reference model, TRM) 和数据参考模型 (data reference model, DRM)。FEA 专注于政府部门的需求, 促进跨部门的协作和资源共享。FEA 与 ToGAF 类似, 也能够为作战体系的组织背景与组织单元交互提供建模方法和视图要素支撑。但是, 组织架构框架主要用于描述组织内部的互操作标准规范和内部运营行为模式, 缺乏对于外部博弈对抗行为的描述。

(2) 面向特性的体系方案设计

体系特性 (又称为性质或者属性) 是与具体使命任务无关的体系本质特征与性能, 是体系能力和效能的决定性因素, 近年来成为体系设计的重点领域^[45]。基于架构的体系设计方法能够从多个视角描述体系设计方案, 为松散耦合的组分系统提供集成标准规范框架; 但是典型的架构框架没有设置体系特性的专门视点和视图, 缺乏针对体系特性的设计方法, 尤其是缺乏对体系性能和任务效能的量化描述, 从而难以支撑设计人员对于体系设计方案某些特性的具体要求。体系工程界针对以上问题, 通过在原有架构框架上定制新的特性设计视图, 或者直接搭建面向体系特性的

架构框架^[46]，也有学者采用复杂网络设计方法对体系特性进行设计^[47]后，形成相应的规则、机制、算法集成到整体架构方案中。有学者甚至认为体系架构设计的重点从组成单元、单元关系转到了规则、准则和策略的设计上，需要改进原有体系架构设计范式，根据体系运行对抗特点来设计动态针对行为特性的演化规则、机制和策略^[48]。

体系特性类型多样，牵涉到多个结构层次，需要对这些特性进行分类和分层研究，具体来说，可以分为体系、群组（包含集群、编队、编组等不同形式）、系统三个层次，结构、行为、功用三种类型^[45,49]。有学者从预设使命能力边界、变化扰动类型强度、变化扰动可预测性、失效管理主动性、响应周期长度、设计-运行反馈性、相关评估指标等方面将体系设计分为效用性、弹变性和适应性三个方面^[50]。本文在以上研究分类的基础上增加长期学习演化性，参考现有研究对于体系特性的定义，主要聚焦体系和群组两层在应对环境和对手变化的动态行为特性，从以下三个方面分析体系特性设计。

一是面向对抗损毁失效的抗毁弹性设计。体系作战是一个双方兵力动态消耗的过程，针对各类损毁失效设计自恢复弹性机制^[51]，在体系设计方案中嵌入功能冗余、拓扑抗毁、链路关系重构等稳健抗毁或者弹性韧变机制，使得体系在内部结构受到冲击或者部分组分系统失效的情况下，仍能够保持一定的能力和性能水平，支撑体系使命任务的有效达成。

二是面向战场态势不确定性的敏捷适应性设计。除了针对内部损毁具备稳健和弹性之外，体系还要针对外部态势变化进行主动式敏捷响应，以有效适应外部环境和对手的干扰和变化，在体系架构方案中预置指控柔性授权^[52]、在线适应性任务规划^[53]、动态力量自组织编配、规则在线强化学习^[54]等适变机制，支撑体系能力在动态对抗中不断学习增强。

三是面向需求边界长期可变的学习演化性设计。体系建设与运用周期长，使命任务需求和作战环境与对手在持续变化中，体系的组成要素也在不断演化，体系设计要充分考虑到需求边界长期可变性，采用架构框架定制或者复杂网络研究方法，设计需求的变更辨识与持续响应机制、智能知识学习驱动的能力持续生成与演化机制^[46]、体系要素的配系组合与创新运用机制，支撑体系设计方案的持续优化和作战能力的长期持续演进^[55]。

（3）多维度综合优化设计

体系总体设计不仅要多个层次、多个领域、多个子系统的角度提供专门的视点或者视图开展针对性的分项设计，还需要对以上各个维度的多类设计要素或者对象进行整体优化和综合权衡，厘清各个分项之间的交互关系，开展各个设计分项的耦合设计和整体优化。针对以上需求，体系工程界借鉴和扩展系统设计层面的多学科优化设计等理论方法，在体系层面考虑海、陆、空、天、网、电等多个作战领域的军种力量联合，侦、控、打、评、保多个作战任务系统的力量单元集成，以及针对多个目标的杀伤任务链路的行动同步^[56]，根据跨层次、跨领域、跨链路的优化设计需求，提出了杀伤链路网络设计^[57]和体系学科优化设计等多维度综合优化设计方法。

多维度综合优化设计的一般过程是：将多个维度的设计变量和决策变量抽象出来，建立体系架构设计方案的定量化模型，运用复杂网络设计分析^[58]、蒙特卡罗仿真实验对多个维度的设计变量和目标变量之间的耦合与交互关系进行分析和计算，然后运用多目标优化、智能学习优化等多种技术对多领域、多子系统、多任务线程之间的交叉、冗余、融合、集成等关系进行迭代设计优化，支撑采用定量计算的方式在体系设计方案空间中寻找可行解、优化解或者满意解。多维度综合优化设计的关键是能够对体系设计方案的相关变量及其关系进行定量化描述和形式化分析，当前，体系设计方案的多维度描述可以通过架构多视图进行描述，但是目前的架构描述方法主要考虑得是异质子系统的描述，对于多链路、多领域的建模能力较弱，并且缺乏对于设计方案的量化建模和分析技术。综合优化从技术本质上来看属于体系优化范畴，将在 2.5 节体系方案优化中专门讨论。

2.3 体系仿真实验技术现状

体系仿真实验充分考虑使命环境和对抗条件，能够随着时间推进研究动态行为，对体系作战过程和作战结果进行计算，具备定性方法和数学解析计算方法所不具备的优势，能够有效支撑体系设计方案的计算实验与评估优化^[59]。因此，体系仿真实验已经成为包含体系设计方案空间探索寻优在内的体系工程研究的主要手段之一，有学者提出了基于建模仿真的体系工程研究范式^[60]。但是，体系的组分异质性、大规模性、层次性、涌现性、演化性等特征给传统的系统建模仿

真方法带来了巨大挑战，体系作战的不确定性和过程演化性难以合理刻画。建模与仿真界在体系层次开展了大量仿真实验相关研究，本节面向体系设计方案空间探索寻优问题，按照以下两个维度进行现状综述分析：一是体系仿真实验的类型，主要包括业务流程仿真、网络分析仿真、作战效能仿真、兵棋推演仿真和实拟-虚拟-模拟（live, virtual, constructive, LVC）一体化仿真；二是体系建模仿真关键技术，主要包括模型开发、仿真计算、交互表现和实验管理。下面分别按照两个维度进行详细分析相关研究现状。

（1）体系仿真实验类型

从体系仿真实验类型来看：1）作战效能仿真是体系方案计算实验的主要手段，能够在明确的作战场景下，对体系对抗双方的作战实体及其时间基动态交互行为进行实验，支撑体系使命效能和任务效能的计算，从而能够为体系设计方案评估提供直接、可信的数据支撑。2）业务流程仿真主要针对某一方体系的作战行动流程为主进行时序行为分析，重点在分析本方的作战任务流程及其资源调度是否合理、高效，具备模型开发成本低、实验速度快等特征，可以体系的流程完成概率等流程行为特征进行仿真实验；但业务流程仿真一般不放在具体作战场景下进行全体系的对抗仿真，没有深入考虑敌方的博弈对抗行为。3）网络分析仿真主要针对体系的实体交互拓扑结构进行基于时序的网络动力学分析，主要从装备联接、兵力协同、作战链路等角度分析体系设计方案的结构特征，能够运用复杂网络相关成果，为体系设计方案提供宏观和整体的计算实验数据，形式化程度高，计算速度快；但是网络分析仿真一般不对作战实体即网络节点内部的行为进行详细研究，并且一般不考虑全体系复杂的博弈对抗行为。4）LVC 一体化仿真采用计算机、实物、半实物与人在回路综合集成的方式开展体系仿真，能够为体系方案的评估优化提供更为可信的数据；但是由于开发和实验成本较高，该方法一般用于体系设计方案中局部关键模型和算法的验证。5）兵棋推演仿真采用人在回路的方式对作战体系的作战运用效果进行推演计算，能够有效融合人类知识经验和机器计算能力，能够探索作战体系的战术条令和运用规则，为体系设计方案的军事需求评估提供有效支撑^[61]；但是由于体系设计方案一般包含新的装备技术和兵力，形成有效的专家知识经验较为困难。

综上，体系设计方案仿真实验各类方法都有

其优劣势，有各自适用的范围和场景：体系作战效能仿真是重量级的行为实验，适用于体系作战场景和实验问题较为明确的情况，能够对体系设计方案空间进行局部深度寻优；体系业务流程仿真和体系网络分析仿真是轻量级的计算实验，无需设定具体的作战场景和明确的作战对手，分别从行为流程和拓扑结构方面支持体系设计方案空间的全局广度探索；LVC 一体化仿真是在体系设计方案具备物理基础或者进入原型研制阶段后，对体系设计方案重量级的局部深度验证；体系兵棋推演仿真是人机融合的轻量级全局行为实验，可用于体系设计方案初始阶段的总体军事需求验证，还可以用于体系设计方案初步定型后的战术技术集成验证。

（2）体系仿真实验关键技术

从体系仿真实验关键技术来看：1）模型开发，针对体系组分系统的异质性，采用多方法、多范式和多形式体系等多建模方法进行组合建模，或者研发多领域描述能力强的新型体系建模语言^[62]；针对组分系统开发工作量大并且要进行基于模型的仿真应用开发，并运用软件工程的领域特定建模和模型驱动架构等技术将需求阶段的体系设计架构模型或者概念模型转换为可执行的仿真模型^[63]；针对体系具备涌现性、适应性、演化性等特征，采用 Agent 建模方法^[64]和深度学习、强化学习等人工智能方法进行规则建模和学习优化^[65]，并且引入博弈论理论进行对抗博弈建模^[66]；针对体系仿真模型的高效重用问题，开展模型框架^[63]和模型工程研究，对模型的全生命周期过程和全方位要素进行工程化管理^[67]，支撑不同应用场景下的仿真应用组合式开发和模型重用。2）仿真计算，一方面，针对异地部署和异质仿真模型进行体系中间件研发，例如测试与训练使能架构（test and training enabling architecture, TENA）^[68]、数据分发服务（data distribution service, DDS）、功能模型接口（functional mock-up interface, FMI），支持体系分布式联合仿真（co-simulation），另一方面进行仿真器算法的研发和调度能力优化，支持仿真效率的提升^[69]；此外，由于体系设计方案的规模复杂性，需要借助更强的算力（分布、并行计算和超级计算机）和新型技术架构（云仿真^[70]）开展体系仿真。3）交互表现，采用虚拟现实、元宇宙等技术增强仿真实验过程和数据的表现能力和人员沉浸感^[71]，更好地服务于决策支持；采用大数据等技术进行数据分析和结果呈现。4）实验管理，针对体系仿

真实验多阶段、多层次和多类型的问题，基于实验战役思想开展实验规划研究^[72]，统筹安排不同仿真平台和仿真实验；另一方面针对实验变量多、空间大等问题，开展近正交拉丁超立方等新型实验设计方法研究^[73]。

2.4 体系方案评估技术现状

体系方案评估是面向使命任务需求，通过综合运用系统分析、系统建模、系统仿真、专家研讨等技术方法，根据体系设计方案中的兵力编成、战场部署、作战运用及作战环境、敌方力量、对抗情况等，对装备作战体系的整体性评价。按照评估内容的不同，体系评估可以分为体系能力评估、体系作战效能评估、体系效费比评估、体系贡献率评估、体系风险评估、体系可行性评估、体系演化过程评估等类型，具体评估方法包括专家调查法、试验统计法、解析方法、仿真实验方法及混合方法等。

对于体系总体设计而言，体系评估的核心是针对体系设计可变量决策点（也称为设计点，Design Point）组合形成的方案权衡空间（Trade space）进行定性定量综合、定量为主的评估^[74]，尤其对不同体系设计方案的能力（性能）、效能和特性进行指标计算，支持体系设计空间的探索寻优和权衡决策。因此，体系设计方案评估需要应对以下复杂性：1）需求不确定，体系设计方案的能力需求难以显式描述，并且会动态变化，体系评估要针对不确定需求具备一定的柔性、稳健性和时间范围适应性^[75]；2）方案复杂性，体系设计方案本身包含多领域、多子系统和多权责主体，在机理、结构和行为方面具备较强的复杂性，尤其是产生涌现、演化、适应等复杂行为，体系评估要给较为全面的指标体系，建立指标体系之间的关联关系，并且能够揭示体系运行、对抗和制胜机理，支持设计决策者有效应对复杂性；3）设计空间大，体系包含的系统组成、整体构型、行为模式等设计点较多，这些设计点的组合形成的方案空间较大，并且具备非线性和不连续性，体系评估要避免设计点组合引起的维度灾难，设置典型和精简的指标体系，支持设计空间的快速探索与有效缩减；4）数据来源类型不同，设计阶段的体系尚未成型，可用真实数据较少，需要综合运用部分已有子系统的数据、专家知识经验和建模仿真实验数据，运用大数据和综合集成研讨等技术，实现定性定量综合、解析计算和仿真数据的综合，实验数据和机理模型的认知一致，支撑体

系设计方案的整体评估。

综上，与传统系统评估不同，作战体系是典型的复杂巨系统，必须基于“整体、动态、对抗”的方式才能评估^[76]。当前，从评估指标分类来看，作战体系设计方案的整体性、动态性和对抗性评估指标主要可分为体系能力（Capability）、体系效能（Effectiveness）和体系特性（Characteristics）3类。

（1）体系能力评估

体系能力是体系完成使命任务的固有“本领”或潜力，它由装备性能、数量、结构和体系特性等因素决定，能够深层次全面衡量体系设计方案的整体水平，但由于能力测度一般是隐性变量，难以直接测量，需要进行多场景综合和网络化指标构建^[77]，甚至采用能力图谱^[78]的方法进行多维度、时间演进和空间分布测度与表示；此外，体系能力评估不仅关注能力指标的量化设计，还需要考虑能力的生成机理，以及对能力进行评估的理论基础元模型和工程化试验评估方法^[41]。

（2）体系效能评估

体系效能是体系能力在特定条件下的具体化表现，它是体系在给定威胁、条件、环境和作战方案下完成使命任务的效果，由装备性能、数量、结构及作战环境、作战过程等因素决定，是一个动态概念。体系效能评估一般针对具体的体系对抗场景，采用解析计算和仿真实验的方式获取评估数据，具备数据来源直接有效，指标解算思路清晰，便于决策人员理解等特征，是体系设计方案评估的重要手段。但是，如何从特定场景和对手的对抗中给出对体系设计方案全面和客观的评价，从多样化体系运行与对抗行为中获取能力的因果机理知识和解算数据支持，是体系效能评估必须回答的问题。目前，业界针对体系效能评估场景的多样性综合，从系统论整体设计效能评估指标体系^[79]，基于OODA和作战环设置效能评估指标并进行机理分析^[80]，基于系统实体结构（system entity structure, SEM）进行效能与能力的综合评估^[81]，尤其是从效能实验数据中进行杀伤链对抗与制胜机理分析与评估^[82]，有效支撑设计人员方案决策。

（3）体系特性评估

体系特性是体系独立于具体使命任务之外的基本特征和性质，对使命任务能力与效能有着决定性影响。体系特性可以从关键特性和使能特性两个方面进行描述^[45]，还可以从结构和行为两方面对其进行刻画，本文按照结构和行为划分。就

结构方面而言，其可分为组分本身的智能化与自主性程度^[83]、信息化程度和组分之间的拓扑结构特征、互操作性、架构复杂性等特性评估；就行为方面而言，其可以分为稳健性^[84]、敏捷性^[85]、适应性^[86]、弹变性^[87]、演化性^[88]、涌现性、同步性等特性评估。与人的能力主要由智商、情商、财商和体质等基础特性决定类似，体系作战能力在很大程度上由上述体系特性决定。当前的体系特性评估主要以复杂网络理论和复杂系统理论为基础，聚焦在基于复杂网络的拓扑结构特征和基于弹性的适变行为特征上，仍然缺乏对于作战体系层级特有的构型模式^[89]、能力机理和运行规律等深层次的特征认识^[76]。此外由于体系研制和使用周期长，体系的可演化性和可持续性（Sustainability）评估^[90]对于体系设计方案决策较为重要，但在设计阶段其重要性容易被忽视^[91]。

2.5 体系方案优化技术现状

体系优化是面向决策要求，根据体系方案的若干关键指标设定优化目标，对体系方案可行空间进行优化指标计算，寻找满足优化目标方案的过程^[92]。按照优化对象的不同，体系优化可以分为体系架构特性优化、体系能力效能优化、体系装备方案优化、体系作战任务优化等类型。具体优化方法可分为解析优化、智能优化和仿真优化等三种类型。对于体系总体设计而言，体系优化的核心是在体系设计方案权衡空间中进行寻优。因此，体系设计方案优化需要应对以下复杂性：1）从优化目标来看，需要应对复杂约束下的多目标组合优化问题，体系设计方案须在经济、技术、社会、环境、对手威胁等多个复杂约束下^[93]，同时满足作战能力、任务效能、经济成本、损失消耗、特性特征、风险控制、时间进度等多个维度的目标要求^[94]；并且，即使是同一个维度，例如作战能力，往往还包括难以统一量化或者归一化的多个子目标。2）从优化对象来看，需要应对体系研发的多权责部门、多阶段、多层次综合优化问题，体系总体设计一般包含多个部门和角色，存在不同的权责和利益攸关方，设计过程包含多个技术环节和多个产品形态；此外，作战体系一般包含多个集群、编队、编组以及下属兵力单元，在结构上具备多个层级，需要开展多权责主体^[17]、多阶段和多层次优化。3）从优化要素来看，需要应对多学科背景下的多能力领域集成优化问题，一方面，体系由异质子系统组成，这些子系

统方案的优化涉及多个作战领域和学科专业，另一方面，体系能力优化是体系优化的核心，体系能力领域包括战术条令、装备技术、组织编制、作战训练、领导力教培、战场设施、人力资源等方面^[95]，需要针对多个学科领域和多个能力领域开展综合优化。

综上，体系优化与系统优化不同，在方案要素数量种类、方案空间规模、目标函数多维性等方面具备更强的不确定性和复杂性。体系工程界针对这些问题特性，在原有系统优化方法和技术的基础上开展了新的探索，具体来说主要分为以下几类研究：

（1）体系组合优化

组合优化在优化问题有两种定义：一是指是一类在离散状态下求极值的最优化问题，这类组合优化问题（combinatorial optimization problem, COP）的特点是其决策空间为有限点集，直观上可以通过穷举法得到问题的最优解，但是由于可行解数量随问题规模呈指数型增长，无法在多项式时间内穷举得到问题的最优解，目前求解组合优化问题的方法主要包括精确方法和近似方法两大类^[96]；二是指利用优化方法来实现组合选择目的的手段，属于组合选择决策理论领域^[97]，英文名为 portfolio optimization，源于美国经济学家 Markowitz 提出的“投资组合”概念，他开创性地建立了金融证券等领域的投资组合方法，从分散风险和回报的角度来评估一组投资资产（如股票、债券、期权、贵金属等），即在获得尽可能大的投资收益的同时使风险尽可能小，形成了现代投资组合理论^[98]，组合优化方法在国防领域得到了广泛的应用^[99]，美国国防部借鉴社会经济领域组合管理的成功经验提出了能力组合管理（capability portfolio management, CPM），并以此为指导开展装备组合和项目组合优化。此处主要考虑第二种方法，该方法主要关注组合价值或者决策空间多个要素之间的关联和约束关系，考虑了应对未来多个不确定场景需求下的稳健性。体系组合优化研究主要有聚焦目标价值层的能力组合优化，聚焦体系要素层的装备组合优化，以及聚焦体系建设方案层的项目组合优化^[100]。总的来看，在军事领域，组合优化已经从宏观的战略规划问题向具体的体系设计问题落地，不仅关注战略目标牵引的跨作战领域装备体系的系统关联配套与衔接协同发展，还关注使命任务牵引的作战体系装备要素的互联互通操作与杀伤链路作战同步，尤其是在体系要素组合关系的考虑上，向

能力生成与运用转变。但是，当前的组合优化研究主要考虑是装备系统和技术等物质要素的组合选择问题，对于体系能力要素全领域组合主要是从项目建设角度开展研究，尚缺乏直接的能力要素组合建模与寻优方法。

(2) 体系多目标优化

主要包括从体系建设角度开展架构方案优化和从体系运用角度开展杀伤链路网络方案的优化。多目标优化在体系层的研究面临新的体系复杂性问题，需要进行创新性研究。首先，体系问题的目标数量通常不止三个维度，如何根据体系方案的决策要求遴选正确的目标集合，或者扩充目标优化的维度，以及如何对多个目标进行有效组合与分解转化^[101]，这些问题对于能否有效支撑体系总体设计方案决策非常重要；其次，由于体系总体设计的要素规模大、领域维度多、时间跨度长、方案空间大、层次结构复杂，体系优化往往具备多模态、多层次、多阶段的问题，多目标优化需要与其它优化技术进行综合开展多目标多模态优化、多目标组合优化、多层次多目标协同优化等；再次，体系设计问题的空间较大，如何能够提高多目标优化算法的收敛速度和优化效率需要研发新的算法^[57]或者综合运用人工智能^[102]等相关领域的前沿技术。

(3) 体系多学科设计优化

多学科设计优化 (multi-disciplinary optimization, MDO) 是一种解决复杂工程系统设计的综合方法，通过充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制，考虑各学科间的相互作用，从系统的角度优化设计复杂工程系统。MDO 利用各学科的相互作用，从整体的角度对系统进行优化，以期获得系统的整体最优解。由于体系组分系统的松耦合性和边界不确定性，难以从学科领域角度建立形式化的学科设计变量及其学科作用关系，这给传统 MDO 方法在体系总体设计优化中的应用带来了挑战。体系工程界尝试从以下几个方面扩展系统 MDO，以有效应对体系层的不确定性和复杂性。

一是拓宽领域的范畴，包括作战能效、经济成本、风险管理，同时放宽对于领域交互和领域强制性约束的限制，从而获得更多可行解空间，一方面可以描述松耦合关系，另一方面避免因领域交互过多出现无可行解的情况。

二是对体系复杂性进行层次、阶段和团队分解，开展多层次、多阶段、多部门的多学科协同优化，将体系划分为系统、子系统和学科领域层，

对学科领域层采用传统 MDO 方法与上层的子系统和系统开展跨层次体系优化^[103]，或者采用拓展设计结构矩阵 (eXtended design structure matrix, XDMS) 来表示上述非层次 MDO 问题，例如有学者将两层集成系统综合 (Bi-level integrated system synthesis, BLISS) 系统嵌套，提出了面向体系优化的三层集成系统综合，即三级集成系统综合方法 (tri-level integrated system synthesis, TLISS)^[104]，以适应多层的体系优化问题。欧盟开展了 AGILE 项目研究飞行器体系多学科设计优化，主要是采用知识架构 (knowledge architecture, KA) 和协作架构 (collaborative architecture, CA)，第一种将整个产品开发过程形式化为多层次结构，后者将整个供应链中的协作过程正式化，并定义了多个利益相关者之间的互动方式^[105]。

三是开展不确定性条件下的 MDO 优化，针对复杂系统的不确定性进行显式和量化建模，并采用试验设计和近似建模方法等降低问题复杂性，建立稳健优化框架，这为体系层的 MDO 应对复杂性和不确定性提供了可行技术方案；但是，体系的不确定性来源除了认知不确定性和随机不确定性之外，还存在需求和边界的不确定性，因此基于不确定性的体系 MDO 问题需要针对性开展研究，并且存在更为复杂的不确定性建模分析、计算复杂性和组织复杂性问题，需要采用机器学习等人工智能策略更为高效地探索优化空间^[106]，实现稳健性的结构化设计优化^[107]。

(4) 体系仿真优化

体系仿真优化基于仿真实验得到的实验数据开展方案分析、拟合和寻优，能够充分利用仿真实验对体系设计方案在动态博弈对抗下的行为特性进行分析、评估和优化。一是基于仿真实验评估的优化，体系仿真优化与体系仿真实验和体系方案评估两个环节具有深度耦合的关系，按照仿真实验类型和评估指标的不同，典型的体系仿真优化方法有体系效能仿真优化，体系网络分析仿真优化、体系流程仿真优化方法等，分别从体系作战任务效能、拓扑结构和流程效率等方面对直接针对仿真实验数据，计算相应评估指标，针对评估指标值优劣开展体系方案优化。二是基于仿真元模型的优化，仿真元模型又称为响应曲面模型，是通过大量仿真实验数据进行输入输出拟合得到的简化模型^[108]，能够对以较低分辨率建立体系设计变量和目标变量的定量模型，这种模型一般采用径向基函数、神经网络、主动元模型

等建立模型的结构，通过仿真实验的训练集和数据集进行参数辨识，从而能够以一定的复制和预测有效性对体系设计方案空间进行快速广度寻优探索^[109]。三是基于人工智能的优化，将遗传算法、深度学习、强化学习、深度强化学习^[110]等人工智能优化算法应用到仿真实验探索中，借助当前计算能力的提升，通过融合仿真实验的数据产生能力和人工智能的智能学习能力，实现行为数据和知识智能双轮驱动的体系设计方案空间寻优探索。

3 面向总体设计的体系工程研究框架

本文对体系总体设计的关键技术环节进行了系统综述，可以看出当前研究虽已取得诸多进展，但整体上仍面临理论框架分散、方法体系不统一等问题。为系统解决这些问题，本部分根据军事领域体系设计的问题特征和研究需求，首先分析体系工程的研究知识领域，明确知识体（body of knowledge）的构成维度；然后在技术现状综述和知识领域分析的基础上，采用V字模型从总体上阐明面向总体设计的体系工程研究流程。

3.1 体系工程研究知识领域

面向总体设计的体系工程研究首先要明确体系总体设计面向的研究对象的知识领域，国际系统工程学会等单位2025年发布的《系统工程知识体指南》对体系工程知识领域进行了总体阐述^[111]，主要包括体系架构设计、体系系统工程、体系解析分析方法、体系与复杂性、体系的复杂性思考原则、体系的社会技术特性、能力工程、使命任务工程等方面，主要集中在工程化技术方面。根据体系总体设计研究需求，结合军事领域体系工程的特点，体系理论知识领域可以划分为三个方面，其中前两个是从问题领域出发，第三个维度是根据知识体指南从工程技术领域出发。

（1）作战行动维度

从体系作战行动角度来看，体系使命所需效果（Mission desired effects）的达成需要一系列基本作战系统执行一系列功能性任务来实现，根据作战体系组成要素所在的问题领域，借鉴美军的网络化兵力（NETFORCE^[112]）、SCMILE^[113]（sensing, command, mobile, information, logistics, engagement）等研究，将体系基本作战行动划分为侦察预警、通信互联、平台机动、指挥控制、火力打击、电子对抗、网络攻防、后勤保障、综合防护等类型。面向总体设计的体系工程要针对

以上作战行动领域开展能力集成架构设计，将基本作战行动任务遂行能力层层聚合为体系顶层使命任务能力。因此，体系工程研究人员必须具备相应的作战行动专业知识，在此基础上研究针对这些作战行动执行主体开展系统组成、能力要求和集成接口等总体设计研究。

（2）建设要素维度

从体系作战能力建设要素角度来看，体系作战能力是通过一系列物质要素和非物质要素有机融合与集成而成^[114]，可采用模型描述体系的能力生成周期^[115]。建设要素通过项目建设形成作战系统、编队和体系作战能力，为作战行动提供能力支撑。根据作战体系能力内涵，借鉴能力工程和美军组织能力要素领域^[116]等研究，将体系能力从建设要素角度划分为军事理论与作战条令（Doctrine）、力量组织编制（Organization）、作战训练演习（Training）、领导力教育（Leadership and Education）、装备技术资源（Material）、人力资源（Personnel）、战场设施保障（Facility）、政策与策略（Policy），以上八方面简称为DOTMLPF-P^[117]。体系总体设计需要明确各建设要素领域之间的关联关系，从能力生成角度设计相应的体系能力产品，牵引出相应的项目采办需求或者能力改进需求。

（3）工程技术维度

体系是系统发展的新阶段，体系总体设计在工程技术方面沿袭系统设计过程模型^[118]所规定的“需求分析-方案设计-计算实验-方案评估-方案优化”技术框架的基础上，需要根据体系的问题特点进行拓展。参照《系统工程知识体指南》所阐述的体系知识领域，综合军事领域系统工程前沿研究进展，将工程技术领域划分为需求分析阶段的使命任务工程、能力规划、作战概念开发，方案设计阶段的架构设计、社会物理赛博系统设计，方案评估阶段的体系效能评估、体系能力评估，方案优化阶段的体系组合优化、智能演化优化，决策支持阶段的多属性决策，以及贯穿各个阶段的组织管理、工程管理、基于模型的系统工程、数字工程等。体系总体设计需要掌握体系工程以及复杂系统工程、组织系统工程相关的基础理论和方法技术，为体系研究的工程化落地提供工程技术支撑。

3.2 体系工程研究业务流程

面向总体设计的体系工程研究关键在于明确

围绕体系总体设计开展的核心业务流程，也就是如何将体系工程研究分解为一系列相关联的步骤。V字模型是系统工程业务流程的典型描述方法，很多学者提出了体系级系统工程的V字业务流程框架^[46,117]。本部分在借鉴以上研究的基础上，采用V字模型对面向总体设计的体系工程核心业务流程进行阐述（如图3所示）。该V字模型遵循三个方面的原则：一是自顶向下与自底向上结合，区分方案设计与实验验证两大类活动，即自顶向下开展需求分析与设计综合，自底向上开展计算实验与评估优化；二是“概念-逻辑-物理”多阶段衔接，面向总体设计的体系工程分为概念设计与需求验证，逻辑设计与方案验证，物理设计与技术验证三个阶段，体系总体设计以逻辑设计与方案验证为主体，向上承接组织系统工程的战略目标和战争设计要求，向下驱动传统系统工程领域的系统总体设计与产品集成；三是同层次设计综合与验证评估闭环，V字模型左侧的需求分析与设计综合形成相应阶段的设计方案模型，右侧的计算实验与评估优化则构建针对性评估指标，并且在同层次针对方案模型开展计算实验，根据实验数据能够解算评估指标，对方案进行验证和优化。下面根据V字模型的逻辑顺序按照层次由高到低对业务活动进行详细阐述。

（1）军事需求分析与需求综合推演验证

第一步为军事需求分析，主要是根据军队战略目标与能力要求，对作战体系的使命任务、作战环境和对手威胁进行分析，形成作战体系设计的战略能力需求与使命任务要求。与第一步对应的是同层次的军事需求综合推演验证（第十步），该步骤主要针对军事需求的能力目标，采用兵棋推演等人在回路的综合推演方法，验证体系设计方案及其产品能否满足军事需求。步骤十执行有两种方式：一是在第一步后完成立即开展军事需求综合推演初步验证，二是在第九步完成后开展最终的军事需求综合推演初步验证，形成最高层次的军事需求分析与验证闭环。根据2.1节的体系需求分析技术现状，亟需加强对于战略目标要求和需求捕获研究；此外，本层次需采用需求架构建模或者MBSE方法，一方面将针对需求进行形式化建模便于向后续环节传递，另一方面要适当进行量化分析和推演，以支持同层次闭环验证优化。

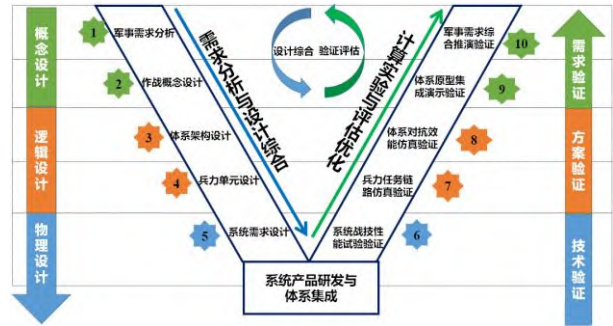


图3 面向总体设计的体系工程业务流程V字模型

Fig.3 A Vee model of SoSE process for general design

（2）作战概念设计与原型集成演示验证

第二步为作战概念设计，主要是根据军事需求对体系作战任务场景、使命任务活动及其预期作战效果、体系概念目标图像等进行设计，本步骤实质上是概念层的体系总体设计。与第二步对应的是同层次的体系原型集成演示验证（第九步），该步骤依据作战概念给出的使命任务效能目标构建实验验证指标，开展内外场结合的实物、半实物、数字模型一体化集成的演示验证，评估体系设计方案能否完成使命任务线程并达成使命所需效能指标。如果积累了一定的模型资源，可在第二步后完成立即开展原型集成演示验证或者数字仿真推演，并且在第九步完成后开展最终的军事需求综合推演初步验证，形成第二层次的作战概念设计与验证闭环。据2.1节和2.3节的体系需求分析技术现状，作战概念建模与推演的工程化研究对于本层的应用落地非常重要，也是当前将作战行动维度知识与工程技术维度知识融合的重点环节，亟需加强这方面的研究。

（3）体系架构设计与对抗效能仿真验证

第三步为体系架构设计，是体系总体设计的核心步骤，主要基于架构框架开展体系任务流程、装备配系、指控组织等体系力量编成结构，任务链路网络以及作战管理适变机制等作战运用机制设计，形成多视图体系设计方案模型。与第三步对应的是同层次的体系对抗效能仿真验证（第八步），该步骤针对体系架构方案建立体系作战仿真模型，开展体系对抗条件下的使命任务效能仿真实验，根据多场景下的体系效能结果综合计算能力指标，验证体系架构方案是否满足体系能力与效能、特性要求。本层与第一层类似，步骤八可在步骤三完成后开展初步验证评估与优化，也可在步骤七完成后针对更为细化的体系设计方案开展进一步的方案空间探索寻优，形成第三层次的体系架构设计与验证闭环。本层次是体系工程

技术最为密集的层次，根据 2.2 节、2.3 节、2.4 节和 2.5 节的技术现状分析，体系架构设计是体系设计方案的主要表示方法，但是也需要关注面向具体设计问题的体系特性设计，并且探索将体系架构设计视图方案转换为可定量设计优化模型，开展体系特性评估和多维度综合优化设计。

(4) 兵力单元设计与任务链路仿真验证

第四步为兵力单元设计，在体系架构的约束下对兵力单元即作战系统进行任务、装备、功能集成设计。作战系统是作战任务-装备功能-组织指控三个方面的综合体，是体系运行和对抗机理的基本载体，是由静态装备体系设计转向动态作战体系设计的关键，作战体系是兵力单元通过功能耦合、任务协作、指控协同三方面的网络化交互形成的作战整体^[25]。与第四步对应的是同层次的兵力任务链路仿真验证（第七步），该步骤根据兵力单元能效评估要求建立兵力单元仿真模型，在杀伤链路对抗背景下开展交战级仿真实验，验证兵力单元设计方案能否满足系统互联、互通、互操作与杀伤链闭环能效要求。本层与第一层类似，步骤七可在步骤四完成后开展初步验证评估与优化，也可在步骤六完成后针对更为细化的兵力单元和杀伤链路方案开展进一步的方案空间探索寻优，形成第四层次的兵力单元设计与验证闭环。根据 2.2 节和 2.3 节的技术分析，兵力单元即作战系统的设计目前研究尚不充分，主要以宏观面向规划的兵力结构设计和微观面向采办的装备设计为主，对于兵力单元设计需在架构约束下考虑建设要素维度的 DOTMLPF-P 多要素融合和作战行动维度不同作战系统的特征，以及采用作战效能仿真和业务流程仿真方法对要素融合效果和杀伤链路网络闭合情况进行仿真评估和优化。

(5) 系统需求设计与战技性能试验验证

第五步为系统需求设计，主要是根据体系架构和兵力单元能力需求，开展装备、设施等兵力单元要素系统的需求设计，牵引系统总体设计。体系总体设计落地的关键在于能够将逻辑形态的体系总体设计方案传递为物理形态的系统总体设计，为系统产品研发和体系集成提供形式化、规范化的输入。与第五步对应的是同层次的战技性能试验验证（第六步），该步骤根据系统战技指标要求针对各类系统产品开展要素融合与组件集成，形成原型系统及其数字模型，在典型作战环境中开展作战使用性能试验，验证原型系统或者其设计方案能否满足系统战技指标要求。本层与第一层类似，步骤六可在步骤五完成后开展初步

验证评估与优化，也可在系统产品研发与体系集成完成后，针对系统原型及其设计方案开展进一步的方案空间探索寻优，形成第五层次的系统需求设计与验证闭环。根据 2.1 节、2.2 节和 2.4 节的技术现状分析，当前系统需求分析以静态的能力差距分析为主，亟需加强动态对抗背景下的体系能力需求向系统需求细化落地。另外，体系贡献率评估是将系统需求与体系要求有机联系的纽带，亟需加强体系贡献率评估优化在系统需求分析中的应用。

4 面向总体设计的体系工程技术发展方向

对照面向总体设计的体系工程研究框架，当前体系工程研究基本覆盖了理论框架的十个核心步骤与三个知识领域维度。尤其从工程技术维度来看，各个环节的研究既有广度，又有深度，为体系级总体设计奠定了坚实的理论基础，提供了丰富的技术积累。但是，从第二节各技术环节中的缺陷分析和业务流程中的技术要求来看，当前的体系工程研究在理论基础、技术体系整体性和部分关键技术深度方面仍存在不足，与系统总体设计已有的成熟的基础理论与成套的技术框架相比还有较大距离，尤其对于知识领域维度的研究缺乏融合性，对于业务流程的多个步骤存在技术支撑不够的情况。针对以上问题，为加快推动体系级总体设计由理论构想向工程技术落地，本部分结合当前系统工程及其相关学科领域的发展前沿，系统分析了每个技术环节存在的问题，针对第二节中的技术现状小结中的问题，提出面向总体设计的体系工程技术发展方向，主要内容如图 4 所示。



图 4 面向总体设计的体系工程发展方向

Fig.4 Development directions of SoSE general design

4.1 体系需求分析技术发展方向

对照面向总体设计的体系工程研究要求,2.1节中综述的体系需求分析还存在以下问题:一是将体系整体分解到子系统的需求研究较多,缺乏从组织战略角度对体系能力需求进行整体性研究;二是研究单项静态需求指标和动态场景下的效能需求指标成果丰富,但在动态对抗背景下的体系能力需求分析较少;三是聚焦体系需求本身的研究较多,但对于用户要求和需求捕获研究较少。针对以上问题,体系总体设计中的体系需求分析技术研究包括以下三个方面:

一是在组织系统工程的背景下开展体系总体设计需求研究,合理界定体系的问题边界,推动组织战略能力驱动体系正向设计,在组织情境中辅助用户从整体上厘清使命任务要求,协同捕获体系作战能力需求,有效应对体系需求的演化性和多元需求不一致性。作战体系的设计需求来源于战略目标与战略能力,是军队在战略方向上遂行重大使命任务的力量组织,作战体系是组织战略能力的重要物质基础,也是组织顶层开展能力组合管理的核心组织单元。采用复杂网络、架构模型等技术建立组织级战略能力-体系使命任务能力-兵力群组作战任务能力-兵力系统作战性能的体系能力需求层级^[116],并且采用结构方程模型、定性定量综合集成分析等方法将作战效能指标综合为体系能力需求指标,从形成对能力需求的结构化、定量化描述。在组织系统工程背景下,采用使命/任务本体^[118]与组织语义模型贯通“战略—使命—能力—需求”,用于界定问题边界、协同捕获社会技术复合系统的能力需求^[119],并处理需求演化的不一致性,形成组织战略能力驱动的数字化正向设计起点^[120,121]。

二是加强作战概念的工程化研究,为体系概念设计提供方法和技术支撑,为逻辑阶段和物理阶段的体系总体设计提供能力需求输入。加强体系概念设计阶段的制胜机理、作战理念、作战样式、作战构想、作战想定的形式化建模描述^[122]、可执行仿真推演与定量化评估优化等方法技术研究,建立作战概念模型规范和评估指标框架,搭建支撑软件平台,为作战设计人员提供工程化研究环境,在需求分析阶段对于体系构型、机制和核心杀伤链线程进行充分的概念推演^[123]。将制胜机理、作战理念/样式/构想、作战想定的形式化描述与可执行评估联通,支撑概念推演与指标闭环^[124,125]。

三是树立使命能力需求正向驱动体系总体设计的理念,运用数字工程和 MBSE 技术,实现能

力需求的模型化描述和模型驱动的体系设计与研发^[48]。针对体系需求工程的问题特征,建立体系能力需求的描述语言规范和模型标准,支持对体系能力需求进行数字化、模型化描述^[126],在此基础上采用 MBSE 的元模型映射和模型转换技术建立能力需求模型与体系设计方案模型之间的映射转换关系,实现需求分析和方案设计阶段的模型连续性,支持能力需求全生命周期的可追溯性和可验证性。依托 MBSE 数学基础^[127]与参考架构^[128]实现能力需求的模型化、可追溯与可验证,并通过技术注入/研发组合估值把使命价值嵌入需求优先级与证据链条,建立需求到方案的模型连续性^[129]。

4.2 体系方案设计技术发展方向

体系架构设计是体系方案设计技术的主要方法,本节聚焦体系架构设计技术的发展方向。根据 2.2 节的现状综述,基于 DoDAF/UAF 的体系架构设计还存在以下问题:一是主要面向体系对抗背景下的国防采办问题,缺乏将组织指挥控制与装备技术有机融合的顶层视点框架,难以有效支撑军事力量的多能力领域要素集成设计,二是在定量校核与分析以及其驱动研发与仿真实验方面存在不足,难以支撑体系设计方案的工程化落地。针对以上两个问题,体系总体设计中的体系架构设计技术发展方向包括以下四个方面:

一是开展组织增强的体系架构设计。借鉴组织系统工程、社会-物理-赛博系统和组织架构框架的相关理论方法,将兵力设计相关研究应用到使命任务层,增加作战体系的组织视点和视图,对于力量编成、指控结构、授权规则、兵力角色等进行针对性描述^[130],能够在装备功能物理域和作战任务活动信息域的基础上,对认知域的指挥控制活动描述和社会域的组织协同描述,并可进一步采用计算组织理论对于力量编组进行量化计算,从而使得作战体系真正意义上成为不断成长和进化具有生命力^[117]的有机组织体,能够体现人员与装备结合、组织单元的概念互操作^[131]和行为同步。将开放式架构与组织/自组织视角结合,把力量编成、指控结构、授权规则与角色分配纳入架构描述,使作战体系具备成长性、适变性与可进化的“有机体”特征^[132,133]。

二是开展 MBSE 和数字化赋能的体系架构工程化设计。MBSE^[134]和数字化技术^[135]的发展为体系架构设计工程化奠定了坚实基础,体系设计人员不仅关注如何采用架构框架的视图模型描述

体系设计方案，还拓展到如何将架构设计产品工程化、设计过程规范化，作为体系工程的核心环节有效承接需求设计和驱动体系研发，具体研究包括以下几个方面：（1）将系统产品的构型模式^[89]、设计模式^[136]、设计规则等引入架构设计，通过明确不同构型对应下的典型架构模式重用和组合规则，提升架构设计模型的可组合性；（2）采用元数据、元模型、本体、知识图谱等技术，增强架构设计产品的数据化、语义化程度，支持架构产品的跨平台互操作、定量分析和因果推理；（3）在前述两个方面的基础上，采用 MBSE 和数字工程技术，实现从需求模型生成架构设计模型，再由架构设计模型转换为体系计算实验模型以及研制方案模型，建立正向设计数字工具链条^[137]，支持模型驱动的体系需求分析、设计、研发一体化^[67,138]。

三是开展 AI 使能的体系架构设计。人工智能技术的发展推动现代战争由机械化、信息化向智能化形态转变，体系设计与人工智能相融合有两个方面的内涵：一是从设计对象来看，要对体系智能或者智能化的体系进行设计；二是从设计方法来看，要运用人工智能技术提高体系设计效率和质量。在人工智能使能架构设计方面，从体系工程发轫阶段就一直采用计算智能方法开展体系架构方案的认知演化设计。近年来，人工智能技术在体系设计中的应用进一步加强^[139]，典型的研究有：将知识图谱用于架构设计方案的语义表示和知识推理以支持智能化架构设计；采用深度学习、强化学习、深度强化学习^[140]的方法辨识和重用架构模式，对体系架构设计空间进行快速探索和高效优化。可以预见的是，随着大模型等生成 AI 技术的飞速发展及其在军事领域的深入应用^[141]，通过对大范围、海量设计基础数据、知识、案例的系统梳理与建模，在大模型技术基础上采用案例推理、知识问答和生成式方案设计提升架构设计的自动化和智能化水平^[142,143]，能够有效满足架构设计对于知识领域的宽度要求，支撑设计方案快速迭代优化。AI 用于架构语义表示、模式重用与设计空间搜索正加速落地；同时，大模型生成工程制品的失效模式提示需建立模型治理与验证闭环，确保可靠性^[144,145]。

四是形成架构中心的体系总体设计技术生态。架构作为顶层结构框架和设计演化的原则指南，对于问题局部细节的描述和解决方案的具体技术途径，难以也无必要提供足够高分辨率和丰富程度的数据、信息和知识。如何实现架构驱动

的复杂问题描述和解决方案设计，搭建基于架构的复杂问题解决方案生态，将需求分析、方案空间管理、计算实验、评估决策^[146]等各系统工程研究环节纳入架构为中心^[117]的体系工程研究生态^[147]，是当前在体系组织中实现 MBSE 的关键。参考数字化转型中的 4A 架构治理与企业架构管控^[148]，在组织实践中不仅通过相关业务活动对架构本身进行反向维护，还可以进一步拓展基于架构的治理内涵，将架构作为体系设计与管控的顶层解决方案框架。在语义化、图谱化、智能化增强体系架构的基础上，将架构作为数据、模型和知识的分类、存放与重用的容器和载体，提供基于架构的解决方案。架构不仅能够“纲举目张”，搭建研究对象和问题的顶层“骨架和脉络”，形成基于架构的问题解决方法与流程；还要能够为架构注入数据、知识、智能和智慧，使其具备“血肉与灵魂”，提供支撑方法与流程实施的资源和手段。从而将顶层框架和细节内容有机融合，面向问题定制领域特定架构视图模型^[149]，开发相关架构制品资源^[150]，能够以问题为导向，从架构制品资源库中提取制品资源，实现设计方案的流程化、组合式构建。

4.3 体系仿真实验技术发展方向

根据 2.3 节的综述，面向体系总体设计要求，当前体系仿真实验研究存在的问题主要有：一是仿真的问题驱动和目的性不强，为“仿真而仿真”，对于仿真的目的缺乏足够的认识，在基于体系设计方案需求的实验方案总体规划和架构驱动仿真应用开发方面研究不够；二是面向体系设计方案仿真的各类方法手段和工具平台没有形成有机整体和合力，对体系问题的复杂性缺乏仿真手段的组合式综合应用；三是仿真对于决策的机理性支撑不够，对于体系特性的仿真刻画较少，对实验数据的因果分析不够，难以给出涌现性、适应性等体系行为的机理性解释，从而难以支持设计方案评估与优化。针对以上问题，面向总体设计的体系仿真实验技术发展方向主要有以下四个方面：

一是在建模方法方面，行为数据与因果机理密切融合的双轮驱动建模范式越来越受到重视，将生成式人工智能^[151]、大数据分析和知识图谱等技术与仿真建模技术融合^[152]，解决体系因果机理存在的复杂性和不确定性问题。通过未知方程状态估计与可解释随机动力学学习将机理约束嵌入数据驱动建模，避免“为仿真而仿真”，提升行

为刻画的可解释性^[153]。

二是在仿真实验方面，人工智能赋能的仿真实验将大幅度提升仿真实验的速度和效率，将机器学习等人工智能技术与仿真实验优化技术有机融合，能够支撑大范围体系设计方案空间的高效寻优，尤其是采用多主体深度强化学习^[154]等技术，能够通过仿真实验对体系的涌现和协同等行为进行定量研究。大规模网络控制的高效强化学习与深度主动优化支撑在超大方案空间内的高效寻优与“仿真-优化”闭环，加速得到可行优选方案^[155,156]。

三是在交互表现与决策分析方面，不仅利用虚拟现实、元宇宙等技术加强数据分析的高阶性与结果展现的沉浸性^[157]，让决策人员在海量的体系数据中迅速理解和获取主要行为结果，并采用知识计算^[158]、网络动力学^[159]等人机协同因果追溯分析技术，使设计决策人员形成对基于仿真实验的设计方案因果机理认知，为设计方案优化提供定量因果知识支持^[160,161]。

四是在仿真平台方面，根据问题特征选择仿真工具组合，加强整体性仿真实验规划^[162]，有效应用现有仿真资源，基于统一建模语言^[163]、统一元建模平台、统一联合仿真标准协议^[164]等体系层集成融合技术范式打造强有力的组合仿真能力包，支撑装备论证、战术创新、技术验证等多种体系仿真研究^[165]。

4.4 体系方案评估技术发展方向

根据 2.4 节的现状综述，体系方案评估存在以下几个方面的问题：一是体系方案评估的基础理论框架尚未搭建，对于体系评估的机理模型和方法论框架尚未达成共识，缺乏体系方案评估的工程化流程规范；二是体系特性和能力的评估尚处于起步阶段，体系特性的分层分类标准及其指标体系设置研究有待深入，体系能力机理生成机制尚不明确；三是现有面向体系设计方案的评估指标体系缺乏整体性和关联性，特性、能力和效能有效综合较为困难；四是对于体系评估的因果机理解释研究不够深入，评估结果的可理解性和置信度存在问题，难以有效支撑设计人员决策。针对以上问题，体系总体设计中的体系方案评估技术发展方向包括以下三个方面：

一是将评估作为独立的技术领域和学科方向，一体化开展体系评估基础理论、方法论框架和工程化规范的系统性研究，主要包括以下方面：遵循评估的第四代范式——价值建构主义理论，

建立体系评估的理论与方法框架；借鉴体系能力试验方法论通过评估元模型（Evaluation Metamodel）^[166]阐明体系能力评估机理脉络的方式，建立面向体系全维度评估的评估元模型；从体系问题、评估策略、指标体系、评估实验、结果分析等角度建立体系评估的全流程工程化实施规范^[167]。

二是综合考虑体系全寿命周期各个阶段、各个层次和各个维度，建立体系特性、能力、效能综合的网络化指标体系，充分运用大数据分析、深度学习、强化学习、大模型等技术建立各类指标的关联关系^[168]，支撑建立体系机理规律、构型特征和行为能效之间的因果机理逻辑关系或者数据统计关联关系链路，支撑决策人员进行溯因与关联分析。高阶超网络、流网络粗粒化与网络之网络等方法把“特性-能力-效能”联结为可解释的多尺度指标网络；DomRank 主导度中心性用于识别结构脆弱性与关键节点^[169,170]。

三是面向智能化战争发展趋势，开展对体系的智能特性和动态演化进行评估^[171]，充分考虑人员、组织、文化等社会域因素对于体系能力生成的影响，以及装备的智能化和无人化发展趋势，将体系视为不断成长、演化的有机组织体或者活生命个体，从自主性、智能性、演化性、成长性、适变性等角度对体系的智能与组织特性进行定量评估。作战体系的韧性能力评估与重构选项联合分析提供“评估-优化”的工程抓手，支撑对智能特征与演化能力的量化评估^[172,173]。

4.5 体系方案优化技术发展方向

根据 2.5 节的现状综述，对照体系总体设计要求，当前体系方案优化研究存在以下问题：一方面，面向体系问题特点拓展复杂系统优化相关研究，能够为体系优化提供可行解决方案，但是原有优化技术并非针对体系问题，存在一定的问题和技术错配性，亟需提出的体系专用创新性优化理论与方法；另一方面，通过将体系复杂性分解、降阶，从而能够综合采用多种现有优化方法达到优化目标，但是这种还原论解决方案会妨碍全局优化，整体性体系方案优化方法是当前的急需。针对以上问题，体系总体设计中的体系方案优化技术发展方向包括以下三个方面：

一是在复杂系统优化研究成果的基础上，根据体系的问题特点开展扩展定制和集成创新。与复杂系统相比，体系具备更多维度的约束与目标，更为动态和复杂的外部环境与需求，更为多样化

的内部关系。有学者根据体系问题特点对现有优化方法进行了改进，但都停留在已有技术改进和局部问题导向层面，没有考虑体系能力全领域和作战全要素。未来研究需要从体系优化的整体问题^[174]特征出发，发掘体系优化的“第一性原理”，开展问题导向的优化基础理论和原始方法创新。

二是将体系设计中的关键变量及其关系提取出来，建立组织战略规划牵引、体系要素支撑的组合优化模型^[100]，开展“设计-实验-评估-优化”闭合迭代的多领域、多子系统、多学科、多链路综合组合优化设计，实现体系设计方案空间的多维度一体化寻优探索。网络演化重建与嵌入、社区学习等网络科学的相关技术刻画结构-功能-风险耦合，有助于抽取关键变量与构建组合优化约束^[175]。

三是将优化与智能仿真实验结合，由于体系寻优空间大，因素影响关系复杂，优化实验计算量大，实验类型多，通过在大样本、多类型、多批次仿真实验中预置人工智能算法支撑仿真实验自动化管理、实验数据智能化分析、优化方向智慧化决策，能够加快寻优速度，提高优化方案质量。此外，针对难以建立解析优化模型的情形，将多智能体深度强化学习、神经网络预测等技术用于仿真实验^[140]，通过对行为实验数据刻画体系的涌现性、协同性、适应性等特征，开展基于联结主义的数据智能与关联分析寻找优化策略，弥补基于因果机理分析优化的不足。

5 总结与展望

本文针对现代战争的体系对抗要求，将总体设计由系统层提升到体系层，为面向总体设计的体系工程提供系统化的解决方案，核心工作及其创新点如下：一是按照系统工程设计过程模型，从需求分析、方案设计、仿真实验、方案评估、方案优化五个环节详细阐述了体系工程技术的研究现状，并分析了面向总体设计的不足；二是在界定体系总体设计设计问题的基础上构建了体系工程研究流程V字模型，划分了体系总体设计的阶段、层次，明确了理论研究的知识领域和流程环节；三是针对总体设计研究框架落地的需求和现状的不足，分析体系工程关键技术的未来发展方向。论文研究能够为第一节中提出的体系正向设计能力不足，设计感不足，工程化支撑技术设施不成体系、不成熟，以及能力产品验证交付困难等问题提供初步的解决方案，为面向总体设计的体系工程研究提供初步的研究框架指导和技术

发展建议。

体系总体设计虽然是系统总体设计层次的跃升，但是在问题特征、理论方法和技术途径都存在本质的不同。体系工程业界不仅需要改造和集成系统层总体设计相关成果的基础上开展理论方法与技术攻关，还要从组织管理、研究生态等多个角度进行全方位的开拓与创新。下面从基础理论、方法技术、平台工具、应用实践和组织机构等五个方面展望未来工作的展望。

(1) 软硬融合的体系总体设计理论研究

系统工程是组织管理的技术，将组织系统工程与体系工程有机融合，开展组织战略情境下的体系总体设计理论研究。组织系统工程与体系工程是当前传统系统工程由复杂系统工程向新兴问题领域发展的新阶段。随着两个领域研究的深入，体系工程界越来越意识到体系的组织特性对于体系工程研究的重要性，这一方面体现在军事领域的作战体系是以作战系统作为基本设计单元，作战系统本身就是多个能力要素集成融合形成的赛博-物理-社会系统^[176]，并且作战系统的协同作战是在组织指挥控制框架下协调完成的；另一方面还体现在体系工程本身的研究需要一系列组织部门协同完成。因此，体系总体设计在组织战略使命任务驱动下需要多个组织部门的协同协作才能顺利开展，必须将两者有效融合，充分考虑体系研究的组织情境和组织特性，才能正确定义体系总体设计的理论边界、概念内涵和技术框架，形成体系总体设计理论并建立体系工程知识体。体系总体设计要求在综合运用软、硬两个方面的系统工程方法论，在各个环节充分应用组织系统工程理论技术，开展组织战略能力驱动体系正向设计的需求分析，组织增强的体系架构设计，体系组织特性评估优化等研究。需要强调的是，我国系统工程界在人理-物理-事理、开放复杂巨系统、综合集成研讨厅^[177]等方面的理论探索，对于体系总体设计理论研究具有重要的指导和支撑作用，要在吸收国外先进成果经验的同时，瞄准解决我国体系总体设计的实际问题，形成有特色、有特点的研究模式与基础理论成果。

(2) 设计范式创新导向的体系总体设计方法与关键技术研究

从方法技术角度来看，体系总体设计研究需要开展设计范式创新，以新范式为指导重塑方法和技术框架。系统总体设计一般遵循“功能-行为-结构”(Function, Behavior, Structure, FBS)设计范式，即系统结构决定行为活动，行为活动提供

功能以满足用户需求^[178]。体系作为“系统之系统”，是系统发展的新阶段^[2]，在功能、行为、结构三个方面的复杂性都大为增强。尤其对于作战体系而言，需要考虑军事领域的竞争博弈、高烈度对抗和动态损毁等特性。因此，从设计角度来讲，设计范式由系统层的“功能-行为-结构”范式演进为体系层的能力-机制-架构（capability, mechanism, architecture, CMA）范式^[95]。这种范式的演进创新要求方法和关键技术同步创新：在需求分析方面，在组织战略目标背景下开展体系能力需求分析，并针对能力需求进行形式化建模与分析，对体系作战能力生成规律进行显式分析与描述，能够对体系能力指标进行计算推演、定量评估与迭代优化；在方案设计方面，基于架构的结构设计不囿于设计可能的组分系统及其交互关系，更重要的是以一系列架构模型族作为设计方案的框架与容器，融入能力生成和行为自适应机制^[50]，构建体系设计方案空间，实现模型驱动的设计方案实验、评估与优化闭环，为决策人员提供面向设计方案空间构建与探索寻优的架构管控支持；在行为实验方面，将体系机理规律认识具体化为行为机制，根据能力生成和对抗规律预设计动力学机制和基本行为模式，针对行为机制设计决策点开展专项实验，收集协同、涌现、弹性、自适应、演化等行为数据。

（3）数智赋能体系总体设计工程化工具平台研究

数字化、智能化技术对系统工程研究产生了深远的影响，甚至有学者提出了开展数智系统工程研究^[179]。引进数字化和智能化技术能够有效应对体系工程问题的复杂性，搭建数字化、智能化工具平台支撑体系总体设计的工程化落地。从数字化角度来看，一方面需要采用数字化技术将体系总体设计的系列产品形式化、规范化表示与存储，支撑在数字化基础上开展基于模型的系统工程开发；另一方面要推动业务流程的数字化转型，将体系总体设计的相关经验知识、标准规范融入到流程执行中，并且根据业务流程数据智能^[180]推动设计业务模式转型。从智能化角度来看，近年来，人工智能技术在体系工程中的应用进一步加强^[139]，人工智能技术及其工具主要从以下三个方面提升体系总体设计效率和质量：一是将知识图谱用于架构设计方案的语义表示和知识推理以支持智能化架构设计；二是采用深度学习、强化学习、深度强化学习^[140]的方法辨识和重用架构模式，对体系架构设计空间进行快速探索和高效优

化；三是随着大模型等生成人工智能技术的飞速发展及其在军事领域的深入应用^[141]，通过对大范围、海量设计基础数据、知识、案例的系统梳理与建模，在垂域大模型技术基础上采用案例推理、知识问答和生成式方案设计提升架构设计的自动化和智能化水平^[142,143]，能够有效满足体系设计对于知识领域的广度要求，支撑设计方案快速迭代优化^[181]。

（4）体系总体设计应用验证研究

当前，体系工程研究尚处于发展阶段，尚未形成业界公认的体系科学理论，从研究范式上看仍然需要采取理论方法研究和工程实践应用双轮驱动的融合式研究范式^[182]。充分借鉴各个领域工程实践的，从最佳行业实践中不断总结提炼出一般理论方法，推广通用技术。尤其是在军事领域，以战略体系能力规划与集成、作战体系战建一体统筹、重大装备体系型号项目研制等问题为牵引，在工程实践问题的解决过程中不断验证和创新作战体系总体设计理论与方法，逐步完善体系总体设计研究框架和技术组合方案。同时学习借鉴航天/交通/民航保障等典型民用领域的体系工程化案例与实践方法，为军事场景的体系总体设计提供可迁移的工具链与流程样式^[183]。

（5）体系总体设计部及其运行机制研究

体系总体设计是一个多部门、多领域协同攻关的复杂系统工程，需要建立总体设计部及其运行机制，不断拓展研究共同体，汇聚研究合力，共同打造完善的协作型研究社区生态。在军队、国防工业部门、相关地方企业成立体系总体设计部或者类似部门，组织领导体系总体设计的理论研究和工程实践，打造专业化的体系总体设计人才队伍。同时，建立跨部门、跨领域协调合作运行机制，进一步丰富和拓展系统集成研讨厅机制，拓展生成式人工智能时代的大成智慧，运用大模型、元宇宙等先进技术，将人机融合的定性定量综合集成分析在体系总体设计中应用落地。

致谢

感谢四川航天技术研究院李兵研究员、军事科学院李志飞副研究员和常强副研究员、国防科技大学束哲副研究员、南京理工大学黄炎焱教授在论文框架讨论和具体研究领域前沿技术综述等方面提供的指导和帮助！

参考文献（References）

- [1] JARADAT R M, KEATING C B, BRADLEY J M. A histogram analysis for system of systems[J]. International Journal of System of Systems Engineering, 2014, 5(3): 193-227.
- [2] 顾基发. 系统工程新发展——体系[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 10-19.
- GU J F. New development of systems engineering: system of systems[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(20): 10-19.(in Chinese)
- [3] TYMCHUK V, TRYSNYUK V. The systematic review of variety of military, weapon, combat and warfare system-of-systems with their new classification and ontology depiction for further concept and design development for the Armed Forces of Ukraine[J]. Military Science, 2024, 2(1): 102-116.
- [4] KEATING C B, KATINA P F. Systems of systems engineering: prospects and challenges for the emerging field[J]. International Journal of System of Systems Engineering, 2011, 2(2/3): 234-256.
- [5] DE BARROS PAES C E, NETO V V G, MOREIRA T, et al. Conceptualization of a system-of-systems in the defense domain: an experience report in the Brazilian scenario[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3): 2098-2107.
- [6] MANSOURI M, MCGRATH M, SCHLOMER D, et al. Report on joint capabilities integration and development system(JCIDS)[R/OL]. [2025-01-10]. https://document.acqirc.org/publication_documents/reports/1664901135.JCIDS_ExecSummary_1004.pdf.
- [7] GOROD A, SAUSER B, BOARDMAN J. System-of-systems engineering management: a review of modern history and a path forward[J]. IEEE Systems Journal, 2008, 2(4): 484-499.
- [8] MALEY J, LONG J. A natural approach to DoDAF: systems engineering and core[®][R/OL]. [2025-01-10]. https://vitechcorp-webdownload.s3.amazonaws.com/technical_papers/200701031621330.ANaturalApproachtoDoDAF2005.pdf.
- [9] REBOVICH G. Enterprise system of systems[M]/JAMSHIDI M. Systems of systems engineering: principles and applications. Boca Raton: CRC Press, 2008: 165-190.
- [10] FEICKERT A. The army's future combat system (FCS); background and issues for congress[R/OL]. (2009-08-03)[2025-01-10]. https://www.everycrsreport.com/files/20090803_RL32888_f0fe8ba4f7d3ecfc371efff2d1b9f2a439f34ddf.pdf.
- [11] Office of the Deputy Under Secretary of Defense for Acquisition and Technology, Systems and Software Engineering. Systems engineering guide for systems of systems: version 1. 0[R]. Washington, DC: ODUSD(A&T)SSE, 2008.
- [12] MARTIN J N, ALVAREZ K E. Using the unified architecture framework in support of mission engineering activities[J]. INCOSE International Symposium, 2023, 33(1): 1156-1172.
- [13] DAHMANN J, KHAW A, BILOIU I, et al. Digital engineering of large scale system of systems: end-to-end (E2E) modeling and analysis environment[C]//Proceedings of the 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE), 2021: 120-125.
- [14] GEZGIN T, ETZIEN C, HENKLER S, et al. Towards a rigorous modeling formalism for systems of systems[C]//Proceedings of the IEEE 15th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops, 2012: 204-211.
- [15] COLEMAN J W, MALMOS A K, LARSEN P G, et al. COMPASS tool vision for a system of systems collaborative development environment[C]//Proceedings of the 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 2012: 451-456.
- [16] BUEDE D M, MILLER W D. The engineering design of systems: models and methods[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [17] SULLIVAN I M. Three dates, three windows, and all of DOTMLPF-P. How the people's liberation army poses an all-of-army challenge[J]. Military Review, 2024, 104(1): 14-25.
- [18] MBAKOP S, TAGNE G, MERZOUKI R. Integrated design method for systems of systems: application to the autonomous management of an industry 4.0 supply chain[C]//Proceedings of the 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe), 2023: 1-6.
- [19] FANG Z M. Multi-stakeholder dynamic optimization framework for system-of-systems development and evolution[D]. West Lafayette: Purdue University, 2017.
- [20] 游光荣. 总体设计部: 钱学森系统科学思想的核心原创与现实意义[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(4): 5-10.
- YOU G R. Overall design department: the core originality and practical significance of Qian Xuesen's thought of system science[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2020, 34(4): 5-10.(in Chinese)
- [21] 于景元, 高露. 系统工程与总体设计部[J]. 中国航天, 2018(8): 6-12.
- YU J Y, GAO L. Systems engineering and overall design department[J]. Aerospace China, 2018(8): 6-12.(in Chinese)
- [22] DRESCH A, LACERDA D P, ANTUNES J A V, Jr. Design science research[M]/Dresch A, Lacerda D P, Antunes J A V, Jr. Design science research: a method for science and technology advancement. Cham: Springer, 2014: 67-102.
- [23] 薛昱, 雷家骥, 曲麒富, 等. 管理方法的革命: 以钱学

- 森总体设计部助推国家治理体系与治理能力现代化[J]. 中国软科学, 2020(12): 145-152.
- XUE Y, LEI J S, QU Q F, et al. Revolution of management method: promoting the modernization of national governance system and governance capacity with Qian Xuesen's overall design department[J]. China Soft Science, 2020(12): 145-152.(in Chinese)
- [24] NCUBE C. On the engineering of systems of systems: key challenges for the requirements engineering community[C]//Proceedings of the Workshop on Requirements Engineering for Systems, Services and Systems-of-Systems, 2011: 70-73.
- [25] KEATING C B, PADILLA J J, ADAMS K. System of systems engineering requirements: challenges and guidelines[J]. Engineering Management Journal, 2008, 20(4): 24-31.
- [26] 郭齐胜, 宋畅, 樊延平. 作战概念驱动的装备体系需求分析方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(6): 1-5.
- GUO Q S, SONG C, FAN Y P. Analysis method of equipment system-of-systems requirement driven by operational concept[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(6): 1-5.(in Chinese)
- [27] 徐向前, 豆亚杰, 钱立炜, 等. 作战体系能力需求敏捷开发方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(10): 3139-3148.
- XU X Q, DOU Y J, QIAN L W, et al. Research on agile development method-of-combat system-of-systems capability requirements[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(10): 3139-3148.(in Chinese)
- [28] 蔡骏, 王超, 马驰. 基于 DoDAF 的陆军信息系统装备体系需求分析方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(2): 55-59, 69.
- CAI J, WANG C, MA C. Equipment system requirement analysis method for army information system based on DoDAF[J]. Command Information System and Technology, 2021, 12(2): 55-59, 69.(in Chinese)
- [29] 任浩亮, 张建超, 程会川. 基于 SysML 的武器装备体系能力需求建模分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(9): 2843-2851.
- REN H L, ZHANG J C, CHENG H C. Modeling and analysis method of weapon equipment system capability requirements based on SysML[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(9): 2843-2851.(in Chinese)
- [30] CECCARELLI A, MORI M, LOLLINI P, et al. Introducing meta-requirements for describing system of systems[C]//Proceedings of the 16th International Symposium on High Assurance Systems Engineering, 2015: 150-157.
- [31] 舒宇. 基于能力需求的武器装备体系结构建模方法与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- SHU Y. Research on the method and application of the architecture modeling of weapon system-of-systems based on capability requirement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.(in Chinese)
- [32] CHIA Y J. Comparison of requirements understanding in model based systems engineering versus traditional methods[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2018.
- [33] WANG Q L, WANG Z X, ZHANG T T, et al. A quality requirements model and verification approach for system of systems based on description logic[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(3): 346-361.
- [34] DELAURENTIS D. Understanding transportation as a system-of-systems design problem[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005: 123.
- [35] MANZANO W, GRACIANO NETO V V, NAKAGAWA E Y. Dynamic-SoS: an approach for the simulation of systems-of-systems dynamic architectures[J]. The Computer Journal, 2020, 63(1): 709-731.
- [36] U.S. Department of Defense. The DoDAF architecture framework version 2.02[A/OL]. (2011-03-03)[2025-01-10]. https://dodcio.defense.gov/Portals/0/Documents/DODAF/DoDAF_v2-02_web.pdf.
- [37] LEVIS A H, WAGENHALS L W. C4ISR architectures: I. Developing a process for C4ISR architecture design[J]. Systems Engineering, 2000, 3(4): 225-247.
- [38] REICHWEIN A, PAREDIS C J J. Overview of architecture frameworks and modeling languages for model-based systems engineering[C]//Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2011: 1341-1349.
- [39] RING S. Activity-based methodology for development and analysis of integrated DoD architectures[M]//SAHA P. Handbook of Enterprise Systems Architecture in Practice. Hershey: IGI Global Scientific Publishing, 2007: 85-113.
- [40] EICHMANN O C, MELZER S, GOD R. Model-based development of a system of systems using unified architecture framework (UAF): a case study[C]//Proceedings of the IEEE International Systems Conference (SysCon), 2019: 1-8.
- [41] DRYER D A, BOCK T, BROSCI M, et al. DoDAF limitations and enhancements for the capability test methodology[C]//Proceedings of the 2007 Spring Simulation Multiconference, 2007: 170-176.
- [42] BONDAR S, HSU J C, PFOUGA A, et al. Agile digital transformation of system-of-systems architecture models using Zachman framework[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2017, 7: 33-43.
- [43] HERMAWAN R A, SUMITRA I D. Designing

- enterprise architecture using TOGAF architecture development method[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 662(4): 042021.
- [44] DEFRIANI M, RESMI M G. E-government architectural planning using federal enterprise architecture framework in purwakarta districts government[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Informatics and Computing (ICIC), 2019: 1-9.
- [45] RICCI N, FITZGERALD M E, ROSS A M, et al. Architecting systems of systems with ilities: an overview of the SAI method[J]. Procedia Computer Science, 2014, 28: 322-331.
- [46] HOEHNE O. The SoS-VEE model: mastering the socio-technical aspects and complexity of systems of systems engineering(SoSE)[J]. INCOSE International Symposium, 2016, 26(1): 1494-1508.
- [47] TRAN H T. A complex networks approach to designing resilient system-of-systems[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2015.
- [48] 张维明, 刘俊先, 陈涛, 等. 一种复杂体系架构设计新范式[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 27-31.
- ZHANG W M, LIU J X, CHEN T, et al. A new paradigm for architecture design of system of systems[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(20): 27-31.(in Chinese)
- [49] GATICA D, PONCE F, NOËL R, et al. Characterizing architectural evaluations and identifying quality attributes addressed in systems-of-systems: a systematic mapping study[C]//Proceedings of the 37th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC). IEEE, 2018: 1-7.
- [50] 王维平, 李小波, 杨松, 等. 智能化多无人集群作战体系动态自适应机制设计方法[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(5): 1096-1106.
- WANG W P, LI X B, YANG S, et al. A design method of dynamic adaption mechanism for intelligent multi-unmanned-cluster combat system-of-systems[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2021, 41(5): 1096-1106.(in Chinese)
- [51] UDAY P, MARAIS K. Designing resilient systems-of-systems: a survey of metrics, methods, and challenges[J]. Systems Engineering, 2015, 18(5): 491-510.
- [52] DUAN T, WANG W P, WANG T, et al. Role assignment mechanism of unmanned swarm organization reconstruction based on the fourth directed motif[J]. Sensors, 2022, 22(22): 8799.
- [53] DUAN T, LI Q, ZHOU X, et al. An adaptive task planning method for UAVC task layer: DSTCA[J]. Drones, 2024, 8(10): 553.
- [54] UNEWISSE M, GRISOGONO A M. Adaptivity led networked force capability[C]//Proceedings of the 12th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS), 2007: 1-23.
- [55] FANG Z M, ZHOU X Z, SONG A N. Architectural models enabled dynamic optimization for system-of-systems evolution[J]. Complexity, 2020, 2020(1): 7534819.
- [56] 蓝羽石, 吉祥, 王一峰, 等. 跨域杀伤网架构及其技术分析[J]. 指挥信息系统与技术, 2024, 15(3): 1-9.
- LAN Y S, JI X, WANG Y F, et al. Architecture of cross-domain kill webs and analysis on its key technologies[J]. Command Information System and Technology, 2024, 15(3): 1-9.(in Chinese)
- [57] 万斯来, 王国新, 明振军, 等. 基于知识推理的杀伤网智能设计方法[J]. 兵工学报, 2024, 45(4): 1025-1037.
- WAN S L, WANG G X, MING Z J, et al. Knowledge reasoning-based intelligent design method of kill-web[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(4): 1025-1037.(in Chinese)
- [58] MARWAHA G, KOKKOLARAS M. System-of-systems approach to air transportation design using nested optimization and direct search[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(4): 885-901.
- [59] ZEIGLER B P, SARJOUGHIAN H S. Guide to modeling and simulation of systems of systems[M]. Cham: Springer, 2017.
- [60] 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.
- ZHANG L, WANG K Y, LAILI Y J, et al. Modeling & simulation based system of systems engineering[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(2): 179-190.(in Chinese)
- [61] 司光亚, 王飞. 基于仿真大数据的体系能力评估方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(3): 5-10.
- SI G Y, WANG F. Research on system of systems capability evaluation method based on simulation big data[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2020, 34(3): 5-10.(in Chinese)
- [62] 张霖, 陈真, 古鹏飞, 等. X语言、方法及工具-支持MBSE的新一代一体化建模仿真技术体系[J]. 系统仿真技术, 2024, 20(1): 1-14.
- ZHANG L, CHEN Z, GU P F, et al. X language, methodology and tools: new-generation integrated modeling and simulation technology supporting MBSE[J]. System Simulation Technology, 2024, 20(1): 1-14.(in Chinese)
- [63] LI X B, YANG F, LEI Y L, et al. A model framework-based domain-specific composable modeling method for combat system effectiveness simulation[J]. Software & Systems Modeling, 2017, 16(4): 1201-1222.

- [64] DE AMORIM SILVA R, BRAGA R T V. Simulating systems-of-systems with agent-based modeling: a systematic literature review[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 3609-3617.
- [65] ZHU Z, WANG T, SARJOUGHIAN H, et al. Knowledge-based and data-driven behavioral modeling techniques in engagement simulation[J]. *Simulation*, 2023, 99(10): 1069-1089.
- [66] 罗俊仁, 张万鹏, 项凤涛, 等. 智能推演综述: 博弈论视角下的战术战役兵棋与战略博弈[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(9): 1871-1894.
- LUO J R, ZHANG W P, XIANG F T, et al. Survey on intelligent wargaming: tactical & campaign wargame and strategic game from game-theoretic perspective[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(9): 1871-1894.(in Chinese)
- [67] KOZMA D, VARGA P, LARRINAGA F. System of systems lifecycle management—A new concept based on process engineering methodologies[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3386.
- [68] 杜楠, 谭亚新. 面向 SaaS 的 LVC 仿真试验中间件设计研究[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(6): 1268-1276.
- DU N, TAN Y X. Design of LVC simulation test middleware for SaaS[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(6): 1268-1276.(in Chinese)
- [69] VAN TENDELOO Y, VANGHELUWE H. Increasing the performance of a discrete event system specification simulator by means of computational resource usage “activity” models[J]. *Simulation*, 2017, 93(12): 1045-1061.
- [70] 刘影梅, 卿杜政. 基于“云+边缘”的建模仿真架构[J]. *自动化技术与应用*, 2023, 42(2): 86-89.
- LIU Y M, QING D Z. Research on modeling and simulation architecture based on microservices[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2023, 42(2): 86-89.(in Chinese)
- [71] LI X, TIAN Y L, YE P J, et al. A novel scenarios engineering methodology for foundation models in metaverse[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2148-2159.
- [72] 李小波, 陆志洋, 钱晓超, 等. 装备体系作战仿真实验规划方法研究[C]//第三十四届中国仿真大会暨第二十一届中国仿真会议论文集, 2022: 989-1004.
- LI X B, LU Z F, QIAN X C, et al. Research on combat simulation experimentation planning method of equipment system-of-systems[C]//Proceedings of the 34th China Simulation Conference and the 21st Asian Simulation Conference, 2022: 989-1004.(in Chinese)
- [73] LI G S, YANG J W, WU Z P, et al. A sequential optimal Latin hypercube design method using an efficient recursive permutation evolution algorithm[J]. *Engineering Optimization*, 2024, 56(2): 179-198.
- [74] 杨松, 王维平, 李小波, 等. 无人集群体系设计与仿真评估方法[J]. *国防科技大学学报*, 2024, 46(3): 126-136.
- YANG S, WANG W P, LI X B, et al. Design, simulation and evaluation method for unmanned swarm system-of-system[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, 46(3): 126-136.(in Chinese)
- [75] VOLKERT R, STRACENER J, YU J F. Incorporating a measure of uncertainty into systems of systems development performance measures[J]. *Systems Engineering*, 2014, 17(3): 297-312.
- [76] 胡晓峰, 杨镜宇, 张昱. 武器装备体系评估理论与方法的探索与实践[J]. *宇航总体技术*, 2018, 2(1): 1-11.
- HU X F, YANG J Y, ZHANG Y. Exploration and practice to the theory and method of evaluating weapon system of systems[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2018, 2(1): 1-11.(in Chinese)
- [77] 胡晓峰, 张昱, 李仁见, 等. 网络化体系能力评估问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(5): 1317-1323.
- HU X F, ZHANG Y, LI R J, et al. Capability evaluating problem of networking SoS[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2015, 35(5): 1317-1323.(in Chinese)
- [78] 赵绍彩, 张海川, 李楠. 作战能力图谱概念和应用研究[J]. *国防科技*, 2021, 42(2): 106-112.
- ZHAO S C, ZHANG H C, LI N. Theory and application of combat capability maps[J]. *National Defense Technology*, 2021, 42(2): 106-112.(in Chinese)
- [79] 肖利辉, 黄玉章. 一种基于系统论思想的作战体系效能评估方法[J]. *军事运筹与系统工程*, 2016, 30(1): 18-22.
- XIAO L H, HUANG Y Z. A method for assessing the effectiveness of a warfare system of systems based on systems thinking[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2016, 30(1): 18-22.(in Chinese)
- [80] 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.
- LI X B, LIN M, SHU Z, et al. Synthesized capability-effectiveness evaluation method of contribution ratio to system-of-systems[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(12): 4520-4528, 4535.(in Chinese)
- [81] 杨娟, 朱延雷, 何榕. 面向装备体系作战效能评估的 SEM 建模与评估方法[J]. *指挥控制与仿真*, 2016, 38(2): 33-36.
- YANG J, ZHU Y L, HE R. SEM model and evaluation method for operational effectiveness assessment of equipment system[J]. *Command Control & Simulation*, 2016, 38(2): 33-36.(in Chinese)
- [82] 曹志敏, 周玉芳. 智能化作战效能评估指标体系构建方法[J]. *指挥控制与仿真*, 2024, 46(6): 137-143.

- CAO Z M, ZHOU Y F. Method of building intelligent warfare effectiveness evaluation index system[J]. *Command Control & Simulation*, 2024, 46(6): 137-143.(in Chinese)
- [83] TORKJAZI M, RAZ A K. A review on integrating autonomy into system of systems: challenges and research directions[J]. *IEEE Open Journal of Systems Engineering*, 2024, 2: 157-178.
- [84] LI J C, TAN Y J, YANG K W, et al. Structural robustness of combat networks of weapon system-of-systems based on the operation loop[J]. *International Journal of Systems Science*, 2017, 48(3): 659-674.
- [85] FANG Z M, LIAO J J, ZHOU X Z. Improving system-of-systems agility through dynamic reconfiguration[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2020: 4466-4472.
- [86] 高化猛, 曹裕华, 陶辰立, 等. 装备的体系适应性评估研究[J]. *军械工程学院学报*, 2016, 28(6): 1-5.
- GAO H M, CAO Y H, TAO C L, et al. Research on the evaluation of equipment adaptiation in equipment architecture[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2016, 28(6): 1-5.(in Chinese)
- [87] WATSON B C, CHOWDHRY A, WEISSBURG M J, et al. A new resilience metric to compare system of systems architecture[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(2): 2056-2067.
- [88] ZHAN G X, LU F, JIANG J, et al. Research on capability evaluation modeling of armored system-of-systems[C]//*Proceedings of the 9th International Conference on System of Systems Engineering (SOSE)*. IEEE, 2014: 207-212.
- [89] 李小波, 王蒙一, 廖咏一, 等. 智能化空天防御作战体系架构设计方法研究[J]. *现代防御技术*, 2024, 52(2): 1-12.
- LI X B, WANG M Y, LIAO Y Y, et al. An architecture design method for intelligent air and space defense combat system of systems[J]. *Modern Defence Technology*, 2024, 52(2): 1-12.(in Chinese)
- [90] 刘俊先, 高岚岚, 陈涛, 等. 体系评估理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- LIU J X, GAO L L, CHEN T, et al. Theory and method of system evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2022.(in Chinese)
- [91] 李小波, 王维平, 林木, 等. 体系贡献率评估的研究框架、进展与重点方向[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(6): 1623-1634.
- LI X B, WANG W P, LIN M, et al. The research framework, progress, and key directions of system-of-systems contribution ratio evaluation[J]. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2019, 39(6): 1623-1634.(in Chinese)
- [92] 李小波, 王维平, 王涛, 等. 装备体系贡献率评估: 理论、方法与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2023.
- LI X B, WANG W P, WANG T, et al. Contribution rate assessment for an equipment system of systems: theory, methods, and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2023.(in Chinese)
- [93] 李文桦, 明梦君, 张涛, 等. 考虑全局和局部帕累托前沿的多模态多目标优化算法[J]. *自动化学报*, 2023, 49(1): 148-160.
- LI W H, MING M J, ZHANG T, et al. Multimodal multi-objective evolutionary algorithm considering global and local Pareto fronts[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(1): 148-160.(in Chinese)
- [94] KONUR D, FARHANGI H, DAGLI C H. A multi-objective military system of systems architecting problem with inflexible and flexible systems: formulation and solution methods[J]. *OR Spectrum*, 2016, 38(4): 967-1006.
- [95] BASTIAN N D, FULTON L V, MITCHELL R, et al. Force design analysis of the Army aeromedical evacuation company: a quantitative approach[J]. *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 2013, 10(1): 23-30.
- [96] 李凯文, 张涛, 王锐, 等. 基于深度强化学习的组合优化研究进展[J]. *自动化学报*, 2021, 47(11): 2521-2537.
- LI K W, ZHANG T, WANG R, et al. Research reviews of combinatorial optimization methods based on deep reinforcement learning[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(11): 2521-2537.(in Chinese)
- [97] 豆亚杰, 徐向前, 周哲轩, 等. 系统组合选择方法及典型军事应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(12): 2754-2762.
- DOU Y J, XU X Q, ZHOU Z X, et al. Analysis of system portfolio selection and typical military application[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(12): 2754-2762.(in Chinese)
- [98] SALO A, DOUMPOS M, LIESIÖ J, et al. Fifty years of portfolio optimization[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 318(1): 1-18.
- [99] TATE D M, THOMPSON P M. Portfolio selection challenges in defense applications[R]. Alexandria: Institute for Defense Analyses, 2017.
- [100] 林木, 王维平, 王涛, 等. 基于使命能力框架的国防项目组合结构优化方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(10): 2829-2839.
- LIN M, WANG W P, WANG T, et al. Optimization method of defense projects portfolio structure based on a mission-capability framework[J]. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2022, 42(10): 2829-2839.(in Chinese)
- [101] 高卫峰, 刘玲玲, 王振坤, 等. 基于分解的演化多目

- 标优化算法综述[J]. 软件学报, 2023, 34(10): 4743-4771.
- GAO W F, LIU L L, WANG Z K, et al. Survey on multiobjective optimization evolutionary algorithm based on decomposition[J]. Journal of Software, 2023, 34(10): 4743-4771.(in Chinese)
- [102] AGARWAL S, PAPE L E, DAGLI C H. A hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization with type-2 fuzzy sets for generating systems of systems architectures[J]. Procedia Computer Science, 2014, 36: 57-64.
- [103] SUBRAMANIAN S V, DELAURENTIS D A. Application of multidisciplinary systems-of-systems optimization to an aircraft design problem[J]. Systems Engineering, 2016, 19(3): 235-251.
- [104] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Integrated system-of-systems synthesis[J]. AIAA Journal, 2008, 46(5): 1072-1080.
- [105] PRAKASHA P S, BOGGERO L, FIORITI M, et al. Collaborative system of systems multidisciplinary design optimization for civil aircraft: agile EU project[C]//Proceedings of the 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. AIAA, 2017.
- [106] WANG C, FAN H R, QIANG X. A review of uncertainty-based multidisciplinary design optimization methods based on intelligent strategies[J]. Symmetry, 2023, 15(10): 1875.
- [107] RAMU P, THANANJAYAN P, ACAR E, et al. A survey of machine learning techniques in structural and multidisciplinary optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2022, 65(9): 266.
- [108] SOARES DO AMARAL J V, MONTEVECHI J A B, DE CARVALHO MIRANDA R, et al. Metamodel-based simulation optimization: a systematic literature review[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 114: 102403.
- [109] ENDER T, LEURCK R F, WEAVER B, et al. Systems-of-systems analysis of ballistic missile defense architecture effectiveness through surrogate modeling and simulation[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(2): 156-166.
- [110] 王子怡, 张凯, 钱殿伟, 等. 一种基于深度强化学习的分布式装备体系优选方法[J./OL]. 系统仿真学报. (2024-06-19) [2025-06-21]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0222>.
- WANG ZI Y, ZHANG K, QIAN D W, et al. A deep reinforcement learning-based approach for distributed equipment nodes selection[J]. Journal of System Simulation. (2024-06-19) [2025-05-27]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0222>. (in Chinese)
- [111] Guide to the systems engineering body of knowledge (SEBoK): version2.12[EB/OL]. (2025-05-27) [2025-06-21]. https://sebokwiki.org/w/images/e/e1/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_v2.12.pdf.
- [112] KEUS H E. Netforce principles: an elementary foundation of NEC and NCO[C]//Proceedings of the 10th International Command and Control Research and Technology Symposium, 2005.
- [113] LUI F, LOWE D, FLAHEVE A, et al. Architecture-based SCMI service framework for systems' integration[J]. INCOSE International Symposium, 2017, 27(1): 996-1010.
- [114] BECK D F. Enterprise and system of systems capability development life-cycle processes: SAND2015-7850[R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2014.
- [115] 王涛, 李小波, 张杰, 等. 基于“项目-能力”关联的战略规划项目体系贡献率评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(8): 2295-2304.
- WANG T, LI X B, ZHANG J, et al. Evaluation method for the system-of-systems contribution ratio of strategic planning project based on "project-capability" association[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(8): 2295-2304.(in Chinese)
- [116] BEHRMAN R A. Structural measurement of military organization capability[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2014.
- [117] 刘俊先, 张维明. 基于能力、架构中心的体系工程过程模型[J]. 科技导报, 2022, 40(6): 83-92.
- LIU J X, ZHANG W M. Capability-based architecture-centric process model for system of systems engineering[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(6): 83-92.(in Chinese)
- [118] BELAY Z M, AXELSSON J. A unified mission ontology based on systematic integration of interdisciplinary concepts[J]. Systems, 2024, 12(12): 567.
- [119] AXELSSON J. An agent-based ontology to support modeling of socio-technical systems-of-systems[J]. INCOSE International Symposium, 2024, 34(1): 1705-1718.
- [120] ZIMDAHL R, KNÖÖS FRANZÉN L. An inclusive method for connecting system-of-systems architectures with stakeholders[J]. Systems, 2025, 13(6): 406.
- [121] PAPAVALIOU S, GOROD A, REACHE C. System of systems engineering governance framework for digital transformation: a case study of an Australian large government agency[J]. Systems Engineering, 2024, 27(2): 267-283.
- [122] 韩琦, 李为民, 李宁, 等. 作战概念及其建模研究综述[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(2): 123-134.
- HAN Q, LI W M, LI N, et al. A review on operational concept & its conceptual modeling[J]. Journal of

- Command and Control, 2023, 9(2): 123-134.(in Chinese)
- [123] 李大鹏. 作战概念研发工程化研究概述[J]. 军事文摘, 2024(7): 23-28.
- LI D P. Overview of Engineering Development of Operational Concepts[J]. Military Digest, 2024(7): 23-28.(in Chinese)
- [124] GREGORY J, SALADO A. An ontology-based digital test and evaluation master plan (dTEMP) compliant with DoD policy[J]. Systems Engineering, 2024, 27(6): 1012-1026.
- [125] EATON C E, CAMPO K X, LONGHURST A, et al. What, when, where, and how many? A systematic review of technical measure selection guidance in systems engineering literature[J]. Systems Engineering, 2025, 28(3): 343-362.
- [126] LANA C A, GUESSI M, ANTONINO P O, et al. A systematic identification of formal and Semi-Formal languages and techniques for Software-Intensive Systems-of-Systems requirements modeling[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3): 2201-2212.
- [127] WACH P, TOPCU T G, JUNG S, et al. A systematic literature review on the mathematical underpinning of model-based systems engineering[J]. Systems Engineering, 2025, 28(1): 134-153.
- [128] KROB D, ROQUES A. On reference architectures[J]. Systems Engineering, 2024, 27(6): 1027-1042.
- [129] JANG H, SUH E S. Technology infusion analysis-based research and development project portfolio valuation[J]. Systems Engineering, 2025, 28(6): 675-690.
- [130] RHODES D H, ROSS A M, NIGHTINGALE D J. Architecting the system of systems enterprise: Enabling constructs and methods from the field of engineering systems[C]//Proceedings of the 3rd Annual IEEE Systems Conference, 2009: 190-195.
- [131] TOLK A. Conceptual alignment for simulation interoperability: lessons learned from 30 years of interoperability research[J]. Simulation, 2024, 100(7): 709-726.
- [132] RADOMAN R L V, HENSHAW M, KING M, et al. Enabling open architecture in military systems: a systemic and holistic analysis[J]. Systems, 2025, 13(3): 207.
- [133] SITTON M, ALON R, REICH Y. Generic architecture for self-organized adaptive platform system of systems[J]. Systems, 2025, 13(5): 368.
- [134] ROGERS III E B, MITCHELL S W. MBSE delivers significant return on investment in evolutionary development of complex SoS[J]. Systems Engineering, 2021, 24(6): 385-408.
- [135] AXELSSON J, FRÖBERG J, ERIKSSON P. Architecting systems-of-systems and their constituents: a case study applying Industry 4. 0 in the construction domain[J]. Systems Engineering, 2019, 22(6): 455-470.
- [136] AXELSSON J. Systems-of-systems design patterns: a systematic literature review and synthesis[C]//Proceedings of the 17th Annual System of Systems Engineering Conference (SOSE), 2022: 171-176.
- [137] 徐璐, 蒋硕, 樊志强, 等. 数智化体系正向设计方法及工具链[J]. 中国科技成果, 2024, 25(16): 49-51.
- XU L, JIANG Q, FAN Z Q, et al. Methodology and toolchain for forward (positive) design of digital-intelligent systems[J]. China Science and Technology Achievements, 2024, 25(16): 49-51.(in Chinese)
- [138] SWICKLINE C, MAZZUCHI T A, SARKANI S. A methodology for developing SoS architectures using SysML model federation[J]. Systems Engineering, 2024, 27(2): 368-385.
- [139] 王纪凯, 豆亚杰, 李婧, 等. 智能决策在军事体系工程的研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(8): 2581-2599.
- WANG J K, DOU Y J, LI J, et al. Review on intelligent decision in the military system of systems engineering research[J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(8): 2581-2599.(in Chinese)
- [140] LIN M L, CHEN T, CHEN H H, et al. When architecture meets AI: a deep reinforcement learning approach for system of systems design[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 56: 101965.
- [141] 高志强, 沈佳楠, 姬纬通, 等. 大模型技术的军事应用综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 801-814.
- GAO Z Q, SHEN J N, JI W T, et al. Review of military applications of foundation model technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 801-814.(in Chinese)
- [142] LOVACO J L, MUNJULURY R C, STAACK I, et al. Large language model-driven simulations for system of systems analysis in firefighting aircraft conceptual design[C]//Proceedings of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2024.
- [143] TEKINERDOGAN B. AI-SoS: a strategic framework for integrating artificial intelligence in system of systems[C]//Proceedings of the 19th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSE), 2024: 57-64.
- [144] NILSSON J, JAVED S, ALBERTSSON K, et al. AI concepts for system of systems dynamic interoperability[J]. Sensors, 2024, 24(9): 2921.
- [145] TOPCU T G, HUSAIN M, OFSA M, et al. Trust at your own peril: a mixed methods exploration of the ability of large language models to generate expert-like systems engineering artifacts and a characterization of failure modes[J]. Systems Engineering, 2025, 28(5): 583-604.
- [146] MARTIN J, AXELSSON J, CARLSON J, et al.

- Decisions supported by the core ontology for missions and capabilities in systems of systems[C]//Proceedings of the IEEE International Systems Conference (SysCon). IEEE, 2024: 1-8.
- [147] TORKJAZI M, RAZ A K. Model-based systems engineering (MBSE) methodology for integrating autonomy into a system of systems using the unified architecture framework[J]. INCOSE International Symposium, 2024, 34(1): 1051-1070.
- [148] HANSETH O, RODON MODOL J. The dynamics of architecture-governance configurations: an assemblage theory approach[J]. Journal of the Association for Information Systems, 2021, 22(1): 130-155.
- [149] BINDER C, NEUREITER C, LÜDER A. Towards a domain-specific approach enabling tool-supported model-based systems engineering of complex industrial Internet-of-things applications[J]. Systems, 2021, 9(2): 21.
- [150] KOTUSEV S, ALWADAIN A. Modeling business capabilities in enterprise architecture practice: the case of business capability models[J]. Information Systems Management, 2024, 41(2): 201-223.
- [151] 马惠敏, 胡天宇. 从建模仿真、生成仿真到智能仿真——仿真技术的过去、现在与未来[J]. 系统仿真技术, 2024, 20(2):101-114, 151.
- MA H M, HU T Y. From modeling simulation, generative simulation to intelligent simulation—the past, present and future of simulation technology[J]. System Simulation Technology, 2024, 20(2): 101-114, 151.(in Chinese)
- [152] 包为民, 祁振强. 航天装备体系化仿真发展的思考[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1257-1272.
- BAO W M, QI Z Q. Thinking of aerospace equipment systematization simulation technology development[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1257-1272.(in Chinese)
- [153] GAO T T, BARZEL B, YAN G. Learning interpretable dynamics of stochastic complex systems from experimental data[J]. Nature Communications, 2024, 15: 6029.
- [154] GRONAUER S, DIEPOLD K. Multi-agent deep reinforcement learning: a survey[J]. Artificial Intelligence Review, 2022, 55(2): 895-943.
- [155] MA C D, LI A M, DU Y L, et al. Efficient and scalable reinforcement learning for large-scale network control[J]. Nature Machine Intelligence, 2024, 6(9): 1006-1020.
- [156] WEI Y, PENG B, XIE R W, et al. Deep active optimization for complex systems[J]. Nature Computational Science, 2025, 5(9): 801-812.
- [157] 王浩宇, 龚光红, 蔡继红, 等. 基于战场元宇宙的动态三维场景感知[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2262-2278.
- WANG H Y, GONG G H, CAI J H, et al. Dynamic 3D scene perception based on battlefield metaverse[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2262-2278.(in Chinese)
- [158] 黄智捷, 王维平, 朱一凡, 等. 面向战略规划评估的知识计算技术[J]. 系统工程学报, 2023, 38(2): 275-282.
- HUANG Z J, WANG W P, ZHU Y F, et al. Knowledge computing technology for strategic planning evaluation[J]. Journal of Systems Engineering, 2023, 38(2): 275-282.(in Chinese)
- [159] NEWMAN M, BARABÁSI A L, WATTS D J. The structure and dynamics of networks[M]. Princeton, N.J. Princeton University Press, 2006.
- [160] MORAN J, ROMELINDERS M, LE DOUSSAL P, et al. Timeliness criticality in complex systems[J]. Nature Physics, 2024, 20(8): 1352-1358.
- [161] SHNIDERMAN E, AVRAHAM Y, SHAHAL S, et al. How synchronized human networks escape local minima[J]. Nature Communications, 2024, 15: 9298.
- [162] 寇雨筱, 杨继坤, 肖飞. 装备体系试验指挥体制与关键环节研究[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(8): 37-42.
- KOU Y X, YANG J K, XIAO F. Research on the command structure and key links of equipment system test[J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44(8): 37-42.(in Chinese)
- [163] ZHANG L, YE F, XIE K Y, et al. An integrated intelligent modeling and simulation language for model-based systems engineering[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 28: 100347.
- [164] POWELL E T, NOSEWORTHY J R. The test and training enabling architecture(TENA) [M]/ TOLK A. Engineering principles of combat modeling and distributed simulation. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 449-477.
- [165] ADLER R, ELBERZHAGER F, FALCÃO R, et al. Defining and researching “dynamic systems of systems” [J]. Software, 2024, 3(2): 183-205.
- [166] STRATIGAKI C, NIKOLAIDOU M, LOUCOPOUS P, et al. Designing a Meta model as the foundation for compliance capability[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Capability-oriented Business Informatics. RWTH Aachen University, 2014.
- [167] ROUSSEAU D, PENNOTTI M, BROOK P. Spectrum and evolution of systems engineering's guiding propositions[J]. Systems Engineering, 2025, 28(4): 572-579.
- [168] 李聪, 佟昭, 李俊杰, 等. 面向网状指标体系的强化学习型作战效能评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(10): 177-183.
- LI C, TONG Z, LI J J, et al. Mesh index system oriented operational effectiveness evaluation method with reinforcement learning[J]. Fire Control & Command

- Control, 2024, 49(10): 177-183.(in Chinese)
- [169] PETE G, TIMÁR Á, STEFÁNSSON S Ö, et al. Physical networks as network-of-networks[J]. Nature Communications, 2024, 15: 4882.
- [170] ENGSIG M, TEJEDOR A, MORENO Y, et al. DomiRank centrality reveals structural fragility of complex networks via node dominance[J]. Nature Communications, 2024, 15: 56.
- [171] 胡晓峰. 复杂体系能力评估问题研究——走向智能时代的体系评估方法变革[J]. 军事运筹与评估, 2024, 39(1): 5-10.
- HU X F. A study on the assessment of the complex system-of-systems——the systematic assessment approach change towards the intelligent age[J]. Military Operations Research and Assessments, 2024, 39(1): 5-10.(in Chinese)
- [172] CHEN W Y, LI W M, ZHANG T. Complex network-based resilience capability assessment for a combat system of systems[J]. Systems, 2024, 12(1): 31.
- [173] FANG Z M, LI H, CHEN D Z. An integrated method for selecting architecture alternatives and reconfiguration options towards system-of-systems resilience[J]. Systems, 2025, 13(1): 9.
- [174] KOSMATOPOULOS E B, MICHAELIDIS I, KORKAS C D, et al. Local4Global adaptive optimization and control for system-of-systems[C]//Proceedings of the 2015 European Control Conference (ECC), 2015: 3536-3541.
- [175] WANG J Y, ZHANG Y J, XU C, et al. Reconstructing the evolution history of networked complex systems[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2849.
- [176] ZHOU Y C, YU F R, CHEN J, et al. Cyber-physical-social systems: a state-of-the-art survey, challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(1): 389-425.
- [177] 王丹力, 郑楠, 刘成林. 综合集成研讨厅体系起源、发展现状与趋势[J]. 自动化学报, 2021, 47(8): 1822-1839.
- WANG D L, ZHENG N, LIU C L. Hall for workshop of metasynthetic engineering: the origin, development status and future[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(8): 1822-1839.(in Chinese)
- [178] GERO J S, KANNENGIESSER U. The situated function - behaviour - structure framework[J]. Design Studies, 2004, 25(4): 373-391.
- [179] 周刚, 王锐, 李凯文. 系统工程的未来: 数智系统工程 [EB/OL].(2022-12-30) [2024-06-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/qeW1aX2vFoTWvzM6d8CYzw>.
- ZHOU G, WANG R, LI K W. The future of systems engineering: digital and intelligent systems engineering[EB/OL]. (2022-12-30) [2024-06-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/qeW1aX2vFoTWvzM6d8CYzw>.(in Chinese).
- [180] 吴俊杰, 刘冠男, 王静远, 等. 数据智能: 趋势与挑战[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(8): 2116-2149.
- WU J J, LIU G N, WANG J Y, et al. Data intelligence: trends and challenges[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40(8): 2116-2149.(in Chinese)
- [181] GUARINIELLO C, DELAURENTIS D A. Technology prioritization and architecture flexibility for space System-of-Systems[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Aerospace Conference, 2023: 1-12.
- [182] GAJARY L C, MISRA S, DESAI A, et al. Convergence research as a ‘system-of-systems’: a framework and research agenda[J]. Minerva, 2024, 62(2): 253-286.
- [183] CHEN J, ZHA D S, GAO K, et al. Model-based approach for civil aviation material support system modeling[J]. Systems Engineering, 2025, 28(4): 557-571.