

# 体系视野下的 MBSE

王维平, 朱一凡, 王涛, 李小波

国防科技大学系统工程学院, 长沙 410073

**摘要** 综述了基于模型体系工程的研究进展及应用情况, 分析了其未来发展需求。从体系架构建模和体系工程流程建模两个方面, 介绍了当前基于模型体系工程的研究、应用方面技术主流。以智能化无人作战为应用背景, 提出了一个多集群智能体系工程研究框架, 并在该框架下分析了基于模型体系工程的研究需求, 从体系和集群两个层面提出了 MBSE 的研究设想和发展策略。

**关键词** 多集群智能体系; 体系工程; 基于模型的系统工程

系统工程是一种用于系统研制的跨学科方法和手段, 它起源于 20 世纪 50 年代, 已在工业、经济、社会和军事等各个领域得到广泛应用。系统工程国际委员会 (INCOSE) 倡导的基于模型的系统工程 (model based systems engineering, MBSE) 致力于改进系统工程中基于模型的方法和技术, 能够比采用传统系统工程更经济、更迅速且高质量地开发复杂系统解决方案, 形成相应的建模能力和系统工程能力。

20 世纪 90 年代中期, 体系问题开始得到学术界重视并尝试加以定义。20 世纪 90 年代后期, 体系研究的重要性初步得到认可, 体系工程研究开始起步。体系工程从系统工程发展而来, 体系的组分系统是独立的、分布的和演化的。体系可以通过将多个协作和相互作用的不确定的系统组合起来实现能力需求。体系工程专注于其组分系统及利益相关者之间的边界和相互作用, 通过对新系统和现有系统的能力进行规划、分析、组织和集成, 将这些系统集成到体系能力中。体系工程既是系统工程的继续也是系统工程的发展, 基于模型的系统工程对于体系工程的发展具有基础性、支撑性的作用, 而体系工程发展给基于模型的系统工程提

供了一个应用、发展的新领域。基于模型的体系工程方法 (model based system of systems engineering, MB-SoSE) 研究得到了 INCOSE 和对象管理组织 (OMG) 的支持<sup>[1-2]</sup>。2010 年, 欧盟资助了一组专门针对体系工程的项目, 其中 COMPASS (comprehensive modeling for advanced systems of systems)<sup>[3]</sup> 和 DANSE (designing for adaptability and evolution in system of systems engineering) 项目<sup>[4-5]</sup> 重点研究面向模型的体系设计方法, 旨在帮助确认到 2020 年该领域的研究潜力。

智能化多集群无人作战是未来智能化战争的重要形式, 是体系工程研究的重要领域, 面临着与工业制造、社会经济等领域的智慧体系相类似的体系化发展问题, 而且面临着毁伤性、对抗性带来的更大挑战。

## 1 基于模型的体系工程

### 1.1 基本概念

体系是由众多“小系统”以松耦合、网络化方式构成的复杂“大系统”。体系也是一种复杂系统, 之所以称之为体系, 是相对于一般“单体”复杂系统而言的。

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2019-02-27

作者简介: 王维平, 教授, 研究方向为系统工程, 电子邮箱: wangwp@nudt.edu.cn

引用格式: 王维平, 朱一凡, 王涛, 等. 体系视野下的 MBSE [J]. 科技导报, 2019, 37(7): 12-21; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.07.002

从这种意义上说,体系是一种“多体网络系统”,因此一架飞机再复杂也不能称为体系,一个机场面积再小也应作为体系研究。体系与系统的区别主要在其复杂性的不同。也可以把体系理解为一种“超系统”,其构成元素可以是能够寻求自身目的、彼此相对独立的复杂系统,但是这些复杂系统可以通过彼此交互寻求某种更大的共同目的。体系的复杂性主要来自其特有的“利益交叉、异构演化、需求模糊、边界浮动、动态进出、多级涌现”的典型特性。

体系工程是一种对能力进行规划、分析、组织和集成的方法,其作用是将已有和新增系统的能力共同融合和转换成一种体系能力,并达到“1+1>2”的效果。波音公司对体系工程有独到的见解的应用。该公司的研究人员将体系工程定义为一种严谨规范的系统工程过程,该过程可以对体系和系统的能力以及支撑这些能力的网络中心架构进行定义,进而将这些能力分配到构成体系的系统和子系统,并对贯穿各系统全寿命周期的设计、生产、维护策略进行有效协调。他们将体系和系统的架构模型作为体系和系统概念化以及建造、管理和演化的主要人工产品,并将其定义为对体系和系统的构成组分、组分间的关系以及分配给各组分的能力的描述<sup>[6]</sup>。

## 1.2 动机和进展

体系工程研究发展过程中,不可避免会遇到问题。美国MITRE公司的Judith Dahmann在2013年对此做了调查分析,向分布在美国、英国和澳大利亚的38名受访者提出问卷,要求受访者给出他们优先关注的体系领域,描述其中3个“痛点”并给出实例,受访者中约60%拥有长期而广泛的体系工程研究经验,他们一共提出了65个可供参考的“痛点”<sup>[7]</sup>。Dahmann将这些“痛点”总结为7方面的问题:(1) 缺乏体系研究权威和资金:体系工程有效的协作模式是什么?(2) 领导力问题:有效的体系工程研究领导的角色和特点是什么?(3) 组分系统问题:将组分系统集成到体系中的有效方法是什么?(4) 能力和需求问题:系统工程理论能否处理体系的能力和需求?(5) 自主性、相互依赖性和涌现性问题:系统工程能否提供解决体系相互依赖性和涌现行为复杂性的方法和工具?(6) 试验、验证和经验总结问题:系统工程方法能否应对体系试验方面的挑战,包括不断增长的体系验证和持续学习方面的挑战?(7) 体系原理问题:体系思维的关键原则、技能是什么,是否

有支撑实例?

基于模型的技术已经吸引了人们的兴趣和投入,以应对体系工程的挑战。体系工程研究对系统工程的需求主要体现在3个方面:第一,工程师必须处理因体系内管理的组分系统因仅有不完全信息而产生的不确定性;第二,仅仅通过组合组分系统的能力,很难获得可信的体系整体能力;第三,体系通常是异构的,这使得它很难满足不同利益相关者的需求和目标,每个利益相关者都可能使用自己领域的专用术语、模型和工具。目前的主要关注点是,在做出详细设计和原型建造决策之前,体系架构、组分系统、基础设施和运行环境4个方面的模型应有助于工程师探索备选的设计方案。这些模型还能用于验证整体可依赖性特征,如复原性和安全性。此外,如果模型具有形式化的语义,就有可能利用计算机辅助分析来及早识别缺陷。

建模与仿真是体系工程分析中不可或缺的部分。欧盟资助开展了2个典型的基于仿真的体系工程研究项目COMPASS和DANSE,其中,COMPASS致力于为体系模型开发提供语义基础和开放的工具架构,DANSE致力于在语义层支持体系生命周期模型的演化、迭代和自适应。

COMPASS项目的核心研究团队由英国纽卡斯尔大学的John Fitzgerald领导,DANSE项目的召集人是德国OFFIS研究所交通部门的负责人Bernhard Josko。美国的Boeing公司是工业界开展MBSOSE研究的领军机构,每年牵头召开的产品数据互操作性峰会,专门组织MBSE领域的研讨。美国海军研究生院针对海上作战领域的基于模型的体系工程开展了广泛的应用研究。美国的普渡大学、约翰霍普金斯大学、英国的拉夫堡大学等也在体系架构模型、体系工程管理及应用等方面开展了专门的研究。

体系架构分析方面也存在“难点”:(1) 体系的复杂性和规模将会增长,作为对其实施管理和控制手段的体系架构需要适当地演化,而相应的工具也需要相应演化;(2) 那些被政府支持的专用体系架构框架可能因为负担不起、无法互操作或存在沟通障碍而不再得到支持;(3) MBSE在体系工程领域内的应用尚未看到投资回报,尽管有部分成果,但不足以广泛推广,基于模型的体系工程还大多停留在纸面上。

总的来看,国际上基于模型的体系工程研究可以归纳为2种模式:第一种模式是基于MBSOSE的体系架

构研究,侧重于体系的集成与权衡优化;第二种模式是基于MBSSE的体系工程流程研究,侧重于体系能力的迭代设计与组织管理。尽管在该领域已经取得不少的工作成果,但基于模型的体系工程仍然是个新兴的主题,其完整的知识体系和技术体系仍有待于不断深入研究。MBSE在应用于体系工程时究竟应当扩展什么和如何扩展仍然是一个热点研究问题。

### 1.3 初步应用情况

1) 海战无人体系<sup>[8]</sup>。该项研究源于美国海军研究生院承担的海军扩展项目,目的是寻求有效设计自主水面舰艇的途径,以支持海军开展的无人体系研究。通过研究提出了一种基于能力驱动、基于模型的体系工程解决方案。该项研究采用基于模型的系统工程原则和多准则决策模型,允许设计人员对各种可能的备选物理体系结构概念进行无偏见的分析研究,并可采用瀑布式流程模型和美国国防部架构框架(DoDAF)建立体系架构,确保在整个研究过程中,对作战能力、适用性、有效性、技术成熟度和风险的定量评估。

2) 海上无人艇<sup>[9]</sup>。美国海军需要一个能力驱动的开发过程来设计和获取新的系统。该项研究提出了基于模型的体系架构开发方法,针对各种可能的物理体系结构寻求解决方案,以满足面向21世纪海上战略的可追溯路径的体系能力的需求。该项研究采用MBSD(model-based systems design)方法,分析了无人艇的体系特征,结合使命任务分析建立了基于功能映射到任务活动的体系架构模型,进行了体系架构分析。

3) 法国防空计划SCCOA<sup>[10]</sup>。法国防空计划SCCOA由数百个已部署的系统组成,包括雷达到指挥/控制中心和电信设备。SCCOA是个典型的体系,它所集成的系统可以单独获得和单独使用,而又能够在各种可能的系统组合中找出是整体性能达到最大的方案。SCCOA的项目管理被分解为若干个低层级的管理决策,每个低层管理决策都有独立的探测、通信和目标指示、拦截系统。这种对SCCOA的逐步分解能够适应不断增长的SCCOA体系和SCCOA自身的更新换代。SCCOA的项目管理采用结合北约架构框架(NAF)的基于模型的系统工程方法,确保系统的一致性。

4) 反水雷战<sup>[11]</sup>。该项研究由美国海军研究生院承担,考虑的体系包括Avenger级扫雷舰、多功能两栖攻击舰、MH-53E重型直升机,以及未来将增加的濒海战斗舰和MH-60S多用途直升机。项目采用体系工程瀑

布模型进行分析和设计,通过处理利益相关者期望确定了基本需求,开发了用于进行仿真比较分析的功能架构和物理架构。

5) 海上救援体系<sup>[12]</sup>。该项研究的主要任务是,针对新型T-ARS(X)级救援船的打捞和拖航综合能力需求,开发一种能力驱动的架构过程,使用基于模型的系统工程方法,将打捞和拖航资产重组所需的功能整合到一个用于开发T-ARS(X)需求规范的内聚框架中。基于MBSE的架构设计采用DoDAF、Vitech公司开发的CORE架构设计工具、海军架构元素参考指南(NAERG)和标准化的作战任务清单来实现。

6) 石油运输体系<sup>[13]</sup>。该项研究由美国国家可再生能源研究室完成。基于MBSE的系统工程方法较好地扩展到这项体系研究中。未来基于氢燃料的体系功能可以根据基于MBSE的功能、需求、架构和测试框架来定义和管理。氢燃料集成控制基线建立在基于MBSE的CORE软件平台上,利用CORE可以组织、协调和记录必要的技术和方案基线,以有效地实现所需的、可行的、基于氢燃料的运输体系。

7) 电网体系<sup>[14]</sup>。电网是一个复杂的体系,具有不同程度的操作独立性、管理独立性、开发演进性、地理分布性和寿命周期独立性,需要从体系工程的新角度、新思维来解决问题。体系工程以网格模型的形式引入基于MBSE的体系工程,提供实现解决方案的方法。电网体系研究将问题抽象为体系的多层属性问题,使用标准化的系统建模工具建立体系中各要素的模型,并在体系层级和更详细层级检查系统。该项研究采用系统建模语言(SysML)和统一架构框架(UAF)来定义体系总体目标、策略、功能、交互、标准、操作和系统架构、系统模式,形成电网网格架构模型。在网格的交汇处建模人员可以建立不同视图。对体系结构的完整视图将导致极其复杂的不适用的图形,通过专注于一个方面则能够用可以理解的方式清楚地传达相关概念。在UAF的定义方式下使用SysML工具,能够进行基于仿真的行为分析和基于可执行和分析参数图的非功能性需求评估。

8) 供应链和价值链<sup>[15]</sup>。在供应链和价值链体系中,企业Agent表现出复杂的自适应和涌现行为,可以针对供应链和价值链建立基于Agent的智能企业模型,对其行为进行仿真并实施管理。该项研究的目的是应用MBSE和体系工程原理,对材料、产品和知识从源头

到目的地的过程进行仿真,考察这一智能演化过程,判断每一个步骤中增加的价值,并总结出一个持续和增强的改进过程。项目采用OpEMCSS(operational evaluation modeling for context sensitive systems)建模工具,将基于模型的系统工程应用到供应链中的各个组件,涵盖从企业运营、制造到运输全过程。在OpEMCSS工具中,MBSE和仿真原理应用到了供应链和价值链的每一个环节,在仿真运行中,这些模型可以被模拟、监控和调整。

9) 自动驾驶汽车安全性<sup>[6]</sup>。该项研究的目的是提出基于模型的分析 and 设计方法,开发基于自适应复原能力的自动驾驶车辆网络体系。项目采用确定性建模和概率建模,以用例模式构建体系行为模型,并探索在体系中实现自适应复原能力的机制。MBSE的应用从自动驾驶车辆网络体系模型开发开始,这个模型需要能够解释不确定性,可以验证,且经得起测试和评估。此外,模型还需要具有足够的灵活性,面对各种类型的突发状况能够做出响应并且复原,而且模型的规模应该能够随网络规模和节点异质性的增大而增大。自动驾驶车辆网络体系建模与仿真要求包括:(1) 自动驾驶车辆专用车道;(2) 想定中的初始设置为所有车辆均为自动驾驶车辆;(3) 自动驾驶车辆自主性水平是SAE四级;(4) 安全性和自适应复原能力的研究限定在一组设定的突发情况下;(5) 使用一组定义为扰动的核心环境变量来定义运行环境;(6) 车辆网络体系架构允许将有人驾驶的车辆引入体系网络,以便进行更全面的建模、分析和设计活动。

#### 1.4 下一步研究需求

将MBSE应用于体系工程并不是一件简单的事情。例如,体系固有的不确定性限制了其描述每个组分系统行为的精确程度。针对这种基于弱指定组分系统而建立的体系,如何导出其可信赖度,需要一个能描述体系组成的语义,该语义允许分析体系整体效果。正式的语义模型已经能在软件中做到这点,但提供不出系统工程师所需要的一系列视图。体系中MBSE的实现还需要考虑多方面内容:(1) 开展系统工程活动的MBSE范式;包括对架构模型的分析验证、对系统架构的分析验证、通过模型直接生成的客户产品、通过模型直接应用的设计方案特征;(2) 系统设计、测试、生产和维护的寿命周期;寿命周期中工作程序的有效性和适用性,如早期启动且持续对产品质量属性进行测量;

(3) 工作程序到MBSE的转换;包括信息模型的表达、MBSE工作环境和相关培训、各阶段能力部署、数据的转换和生成。

## 2 MBSOSE 当前两大技术主流

### 2.1 面向MBSOSE的体系架构建模

#### 1) 基于UPDM的体系架构<sup>[17-18]</sup>。

INCOSE和OMG在2009年组织了一个行业标准团队,目标是在OMG的前期工作基础上,开发一个支持DoDAF和英国国防部架构框架(MODAF)的统一建模标准,称为UPDM(unified profile for DoDAF and MODAF)。UPDM利用现有的SysML标准来满足对需求、参数、分配和其他关键特性的描述,使UPDM能够与SysML模型集成到系统顶层的规范、设计和分析中。UPDM团队后期还利用了北约的体系结构框架标准NAF(NATO architecture framework)。

UPDM的目标是显著提高与企业相关的系统体系结构建模的质量、生产力和有效性,促进体系结构模型的重用和可维护性,改进工具的互操作性,加强与利益相关者之间的沟通,并减少由于不同类型的工具实现和不同时期的语义培训而造成的影响。SysML提供的功能包括物理建模和逻辑建模、接口定义、需求定义、功能建模;参数化和多级抽象提供了强大的建模功能。UPDM不是一个新的架构框架,它提供了一种一致的、标准化的方法来描述基于UML的DoDAF、MODAF和NAF架构以及交换的标准。

体系架构的开发受到诸如操作独立性、组分系统异质性、涌现行为和大规模分布等特征的挑战。空客公司的Imad Sanduka提出一种基于简洁建模的体系结构优化方法,在架构模式、实时需求方面对UPDM进行扩展,扩展了体系设计阶段早期的时间分析和优化工作,利用混合整数线性规划进行优化,满足实时和可靠性要求,优化结果能够返回到UPDM模型。

#### 2) COMPASS的体系架构<sup>[9]</sup>。

COMPASS意即先进体系的综合建模方法,旨在开发和评估支持基于模型的体系工程的语言、方法和工具。其中采用了基于契约的方法,通过使用形式化语言(COMPASS建模语言CML)明确地记录对组分系统的信赖和担保,并在利用CML语义的正规性帮助权衡分析和保证体系全局属性的前提下,对这种信赖和担

保进行分析。通过CML将契约风格的行为抽象模型与通用语言表达的形式化模型联系起来,构建用于分析契约描述组合而成的体系整体属性的工具,图1给出了这种方法的技术特点。

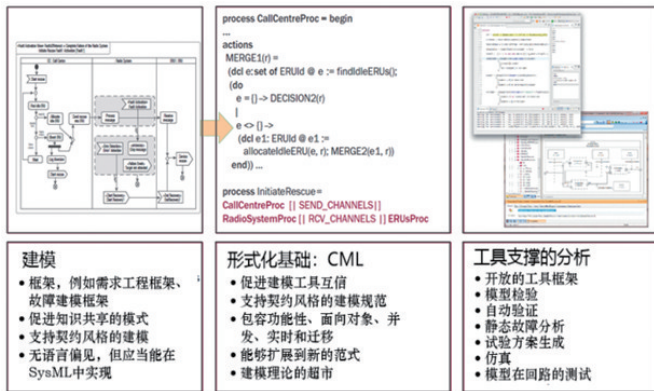


图1 COMPASS的技术特点

COMPASS的一个优势是在实践中产生框架来管理模型构造的复杂性和体系分析。例如,COMPASS的需求工程流程SOS-ACRE,能够帮助管理体系工程中固有的可能冲突的需求和变化的期望,这就扩展了基于系统运行背景的需求工程,其视图可以兼容体系层级的目标和单个组分系统的需求。又如,COMPASS的故障建模架构框架定义了能够帮助工程师系统地针对故障和恢复过程建模的视图。COMPASS的理念是提供帮助工程师“自行开发”的方法。COMPASS以自己的方式将这种途径定义为一个框架:COMPASS架构框架的框架(CAFF),该框架概述了生成一个可用的和内部一致的架构框架所需要的步骤和视图。如此形成了一种描述公共体系架构并为分享经验提供基础的识别模式。契约模式识别有助于定义契约一致性关系、功能和行为的观点。

### 3) DANSE的体系架构<sup>[4-5]</sup>。

DANSE意即用于体系适应性和演化性的设计方法,旨在开发“一种新的方法来支持反映寿命周期演化性、自适应和迭代循环的体系建模,该模型基于体系互操作的形式化语义,并由新型的分析、模拟和优化工具支持”。

DANSE项目通过考虑体系的特定特征(管理独立性和运行独立性,以及演化性和动态性)、利用架构模型作为支持设计验证早期分析和模拟活动的直接输入、扩展使用UPDM作为参考架构框架的MBSE实践活动,增强现有的基于模型的架构框架,支持体系工程寿

命周期。

DANSE提供基于正式语义的寿命周期模型和用于分析与仿真的工具套件。DANSE工具链通过使用通用的Hub来实现工具间交换。在所谓“语义中介”概念的基础上,使用不同符号的不同工具生成的模型在不同层次上进行转换。该方法允许工具之间的共享和转换,这样用户便可以选择在自己熟悉的环境中工作。转换工作首先使用来自目标本体的概念丰富输入模型,得到一个为2种相关的语言提供转换服务的、丰富却不清晰的模型。下一步就是对这个丰富的模型进行过滤,留下在目标本体中合法的清晰的概念。在转换过程中,转换流之间没有主方向,双向都可以被描述。这种转换依赖于模型与本体之间的某种程度的公共语义重叠。DANSE采用比工具链架构更加灵活的轮辐式体系架构(图2),因为它对工具使用顺序或其他工具的参与没有任何前提条件。集成到Hub的工具包括:所有在架构框架中明确的支持架构描述和分析的工具、架构动态生成和优化的工具、组分系统描述和分析工具、组分系统建模与仿真工具、行为分析工具。

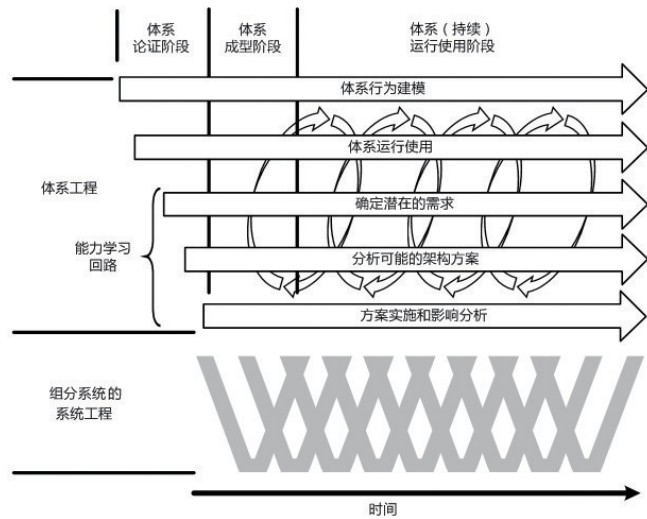


图2 DANSE的轮辐式体系架构

DANSE项目建议使用仿真工具来优化架构。DANSE工具集支持备选体系架构的生成,并且通过使用Rhapsody插件,可以将体系架构导出到XML中,从而导入DANSE的仿真平台——DESYRE。DANSE还采用契约方法来规范体系和组分系统行为。DANSE工具套件提供验证体系各个方面的能力。DANSE定义了目标和契约规范语言(GCSL)来正式捕获体系需求和组分系统的需求,每项需求都设定相应概率指标,并且可以通

过统计模型检验工具 PLASMA 自动验证。DANSE 使用 UPDM 统一规范描述体系架构,其中包含了能够表示组分系统之间的交互作用的场景视图、活动视图和框图,同样包括能够代表捕获涌现行为相关元素的场景视图、活动视图和框图。

#### 4) 一体化可执行体系架构<sup>[19]</sup>。

可执行架构是指可以对体系静态架构进行仿真的架构。开发一体化可执行架构的目的是:(1) 确定体系组分系统对整体性能的贡献,并揭示涌现性质;(2) 证明体系在运行环境内的工作能力;(3) 发现体系运行过程中的瓶颈,寻找最优的体系运行组织流程;(4) 保持体系运行组织流程与体系组分系统设计之间的协同。

一体化可执行架构的有点是:(1) 集成的可执行架构能够使原先处于静态的且分离的业务流程和系统设计实现动态组合,从而实现动态组合仿真;(2) 仿真环境将提供关于系统性能的度量指标,从而帮助系统工程师进行系统性能分析并支持体系架构的选择;(3) 使用共同的仿真框架能够使系统设计师和流程设计师进行更紧密的协作;(4) 可执行架构支持涌现性质分析,仿真结果将有助于揭示涌现行为,这些有意或无意的行为很难单独在静态数据的基础上做出预测;(5) 仿真和架构之间的密切关系能够确保对仿真结果的展示;(6) 通过保持需求的可追溯性,能够将仿真结果映射到特定的需求;(7) 若单个层级能够彼此相互独立地演化,使命任务场景能够自动执行完成回归测试,并确保整体行为始终有效。图3给出一体化可执行体系架构开发方法的概要模型图。

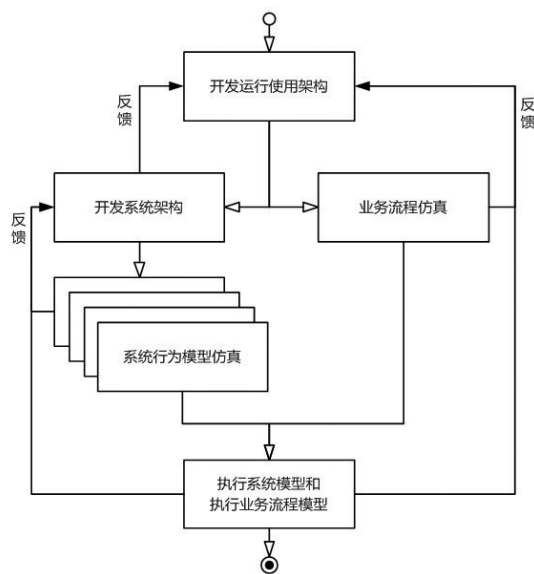


图3 可执行体系架构开发模型

#### 5) 其他体系架构研究。

基于 DEVS 的架构。离散事件系统形式体系 (DEVS) 是建立在一般系统理论基础之上的,具有数学上的严格性,并且已经存在了40年以上。Saurabh Mittal 在 DEVS 的基础上提出了 DEVS 统一过程 (DUNIP)<sup>[20]</sup>,旨在将 MBSE 和 MDE 合并为模型驱动的系统工程 (MDSE),并将其应用于以网络为中心的环境中。

基于 SOA 的体系架构<sup>[20]</sup>。在体系中,因为互操作性要求,或因为虽缺少互操作性但集成为体系,组分系统和子系统之间时常相互作用。在以网络为中心的体系中,系统集成使用基于标准的协议和中间件,如 XML、SOAP 等,并通过 Web 服务描述语言 WSDL 指定的服务接口进行交互,这样便形成了基于 SOA 的体系架构。若系统架构中的组分系统使用事件/消息进行通信,则称为事件驱动架构 (event driven architecture, EDA)。SOA 是 EDA 架构的重要推动者。

基于 Agent 的架构<sup>[21]</sup>。美国密苏里科技大学的 Cihan Dagli 提出了一种基于 Agent 的体系开发模式。在波浪模型的框架下建立基于 Agent 的模型 (ABM),可以使用不同的初始体系架构和不同的输入参数运行模型。基于 Agent 的仿真结果并不像离散事件模型的结果那样简单,它能够在各种诸如资金、优先级、性能等不同的外部参数条件下确定不同系统中的不同行为,以及这些行为最终对体系能力、规模、资金等方面的实际影响。基于 Agent 的体系架构能够反映哪些系统能够与体系 Agent 合作,并在波浪模型的“第一个波浪”中提供所请求的功能。若某个系统无法在此“波浪”中提供请求的能力,体系 Agent 可以与此系统进行协商以提供后续的能力。

## 2.2 面向 MBSOSE 的体系工程流程建模

1) VEE 模型<sup>[22]</sup>。体系工程是通过计划、分析和集成组分系统,形成比这些组分系统能力总和还大的体系能力。体系工程跨越体系整个寿命周期,每个阶段都同等重要。体系工程 VEE 模型建立在系统工程 VEE 过程模型基础上,一般由3个部分组成:一是体系架构和需求开发,对应 VEE 模型的左上部分;二是组分系统的设计与开发,对应 VEE 模型的底部;三是使命任务保证,对应 VEE 模型的右上部分,包括体系互操作性和认证,体系部署、操作和维护等活动。

2) 瀑布模型<sup>[11,23]</sup>。主要活动包括:(1) 需求分析。为了对当前和计划中的体系进行准确和有意义的分

析,必须进行需求分析以了解利益相关者需求,由此获取体系的能力和性能需求,并将其转化为系统需求。(2) 功能分析。在需求分析期间确定的高层级功能需求并没有为后续的物理合成提供足够的细节,需要进行功能分析,将高层级功能分解为低层级功能。(3) 物理合成。对功能架构进行物理映射与合成,开发体系物理架构并开发体系架构模型。(4) 备选方案分析。采用适当的工具和方法对当前和计划中的体系进行评估,还需要考虑和分析模型开发平台和模拟结果分析平台,确定满足研究要求的平台。

3) 波浪模型<sup>[24]</sup>。波浪规划的概念是由澳大利亚项目管理专家 David Dombkins 提出的。作为一种工程设计的方法,波浪模型用来描述设计过程的必要步骤。体系工程的波浪模型由梯形模型构建,它描述了体系工程所需的必要元素,波浪模型将此过程线性化为一组随时间发生的迭代步骤(图4)。与 VEE 模型类似,波浪模型显示一个包含分析、开发和实现的过程,并在这些步骤之间进行反馈。与 VEE 模型不同的是,波浪模型在整个过程中明确地描述了分析和结果反馈。波浪模型的时间特征能很好地捕捉到体系的演化特性,并对体系进行反复迭代分析。波浪模型是随时间向前推进的,使得采用波浪模型的分析人员可以直接根据体系(模型)的表现做出调整,以实现特定的计划。波浪模型的每一波分析将产生一个新的体系控制基线,该控制基线将重新进入体系分析步骤,重复进行下一波分析并贯穿于体系的寿命周期。

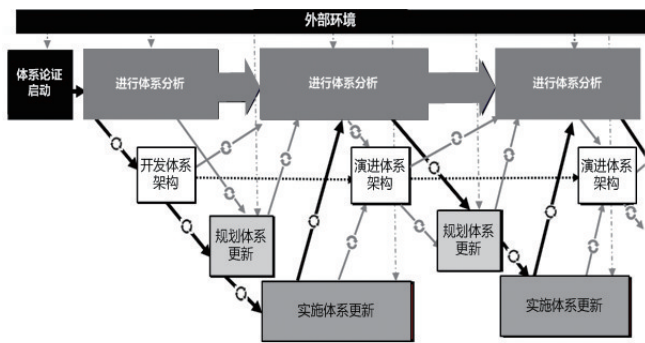


图4 体系工程过程的波浪模型

### 3 面向多集群智能体系的MBSoSE 思考

#### 3.1 多集群智能体系概述

集群行为是一种在生物界广泛存在的集体行为,最典型的例子是一群生物聚集在一起飞行或朝特定的

方向运动。生物界中的昆虫、鸟类、鱼类、水生动物、人类及菌类都会出现集群行为。近年来,随着无人自主技术的迅速发展,机器类集群技术及其作战运用已广为人知。机器集群的灵感来源于自然,例如无人机集群概念起源于蜜蜂。蜂群内分工明确,个体之间存在着丰富有趣的生物交流语言、集群智能和社会行为。蜂群的集群智能来源于群居性生物通过协作表现出来的宏观智能行为,具有分布式、无中心、自组织的特点,这种智能已经被无人机集群所模拟和利用,并被扩展为“有人主机带无人机蜂群”“无人主机带无人机蜂群”和“完全对等型无人机蜂群”等多种战术编组方式。无人机集群比单机平台具有功能分布化、体系生存率高、效费交换比高等作战优势,已在覆盖侦查、饱和攻击等方面得到应用。

除了无人机“蜂群”之外,还有模拟“狼群”的导弹弹群、模拟“蚁群”的战车车群以及模拟“鲸群”的舰艇艇群等。将这些处于不同作战领域、担负不同作战任务的无人自主的武器装备作战集群组合在一起,并且在非层级、网络化的协同合作机制下组成联合作战力量,就可以构建一种所谓的多集群智能化无人作战体系,简称多集群智能体系(multi-swarm intelligent system of systems, MISoS)。这类多群联合的无人作战体系可以单独承担作战任务,也可以与有人作战集群一起构成更大的作战体系,共同承担更加重大、复杂的作战使命,是联合作战体系的一种重要形式,其体系概念总体模型如图5所示。多集群智能体系所关注的关键能力特征有:(1) 体系贡献率价值观;(2) 多任务线程联合作战;(3) 他组织和自组织混合控制;(4) 杀伤链动

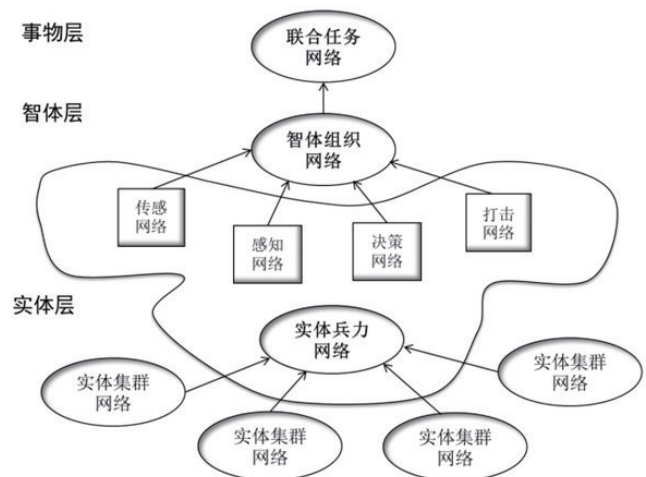


图5 多集群智能体系概念总体模型

态重构;(5) 体系组分和关系的动态重组;(6) 基于集群的组织智能;(7) 平台/任务/组织和智能的无人率。

### 3.2 体系概念原型价值链理论

体系概念原型指如何依据联合作战需求文本,制造一个概念级多集群体系原型,并对其进行基于体系对抗仿真的演示验证。概念级多集群体系原型是能够表达体系关键能力特性和技战术概念,经过演示验证并支持体系贡献率测评,由数字模拟、虚景模拟、实物模拟共同构成的LVC模型。为此,可将多集群智能体系工程(multi-swarm intelligent system of systems engineering, MISoSE)定义为一种体系概念原型工程,其目的是将联合作战需求转换为满足指标要求的体系概念原型,该原型可以支持体系概念演示验证和集群系统开发与测评,其价值链闭合回路如图6所示。

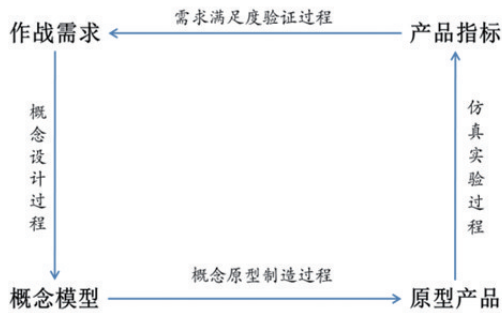


图6 体系概念原型价值链闭合回路

图6中的体系概念原型价值链的功能是实现从初始需求到合格原型的转换。将这一转换过程定义为体系概念设计、集群系统设计、集群原型开发、体系原型开发等4个步骤,其核心是机理、架构和能力的转换(图7)。

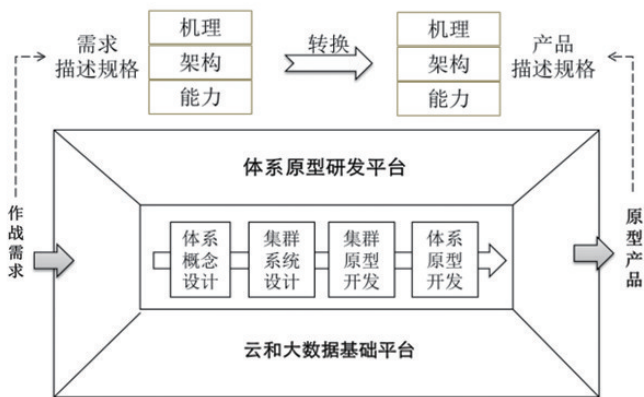


图7 体系概念原型制造过程

像其他工业产品可以进行智能制造一样,体系概念原型也可以进行智能制造,其前提是将机理、架构和

能力的转换过程作为一个在云计算和大数据平台支持下的智能化过程,包括分别面向机理、架构和能力的智能计算、优化和仿真(图8)。

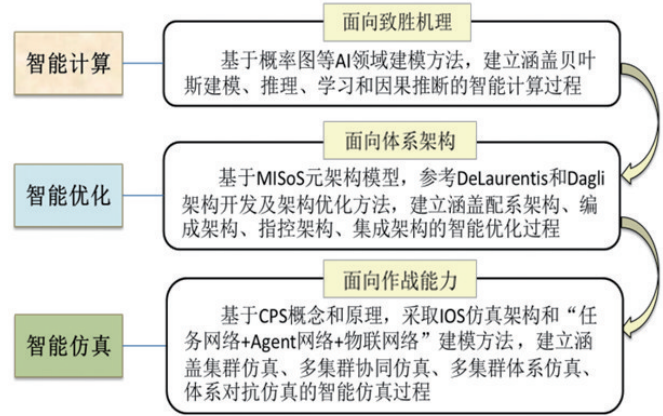


图8 体系概念原型智能化制造方法

### 3.3 体系工程过程模型

按照图5所示的体系概念原型价值链回路,围绕着从初始需求到合格原型的转换的4个步骤,可以建立如图9所示的面向多集群联合体系的体系工程过程。该过程可以划分为体系系统工程、集群系统工程和平台系统工程3个层面,但一般关注的是上面2个层面的工作。第3个层面的工作属于平台系统采办的范畴,而这一部分工作通常只需按照上面2个层次的需求进行定制,因此所占的分量不大。体系层面(A<sub>1</sub>到A<sub>6</sub>)和集群层面(B<sub>1</sub>到B<sub>6</sub>)的系统工程工作一共包括12个步骤,其中V字的左侧(A<sub>1</sub>到A<sub>3</sub>及B<sub>1</sub>到B<sub>3</sub>)为设计侧,右侧(B<sub>4</sub>到B<sub>6</sub>及A<sub>4</sub>到A<sub>6</sub>)为实现侧。

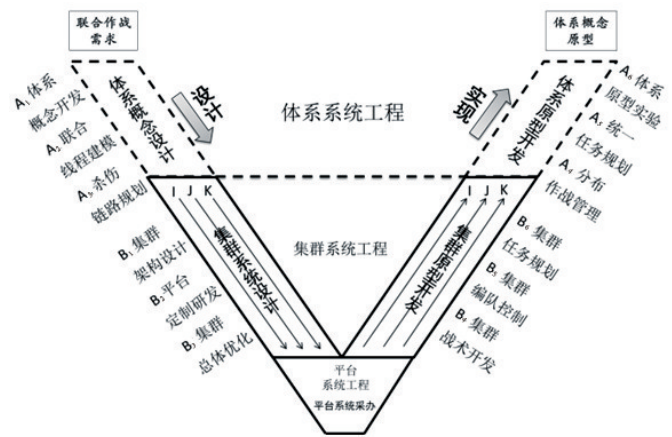


图9 多集群智能体系工程过程模型

### 3.4 对MBSOSE的思考

在图7到图9的基础上,可提出图10所示的面向MISoSE的MBSE研究框架。该框架把MBSE区分为体系

和集群2个层面,并且进一步划分与体系工程工具集相结合的4个领域。MBSE各领域统一按照机理、架构、仿真(MAS)3个通道进行建模,领域间也按此3通道进行模型转换。

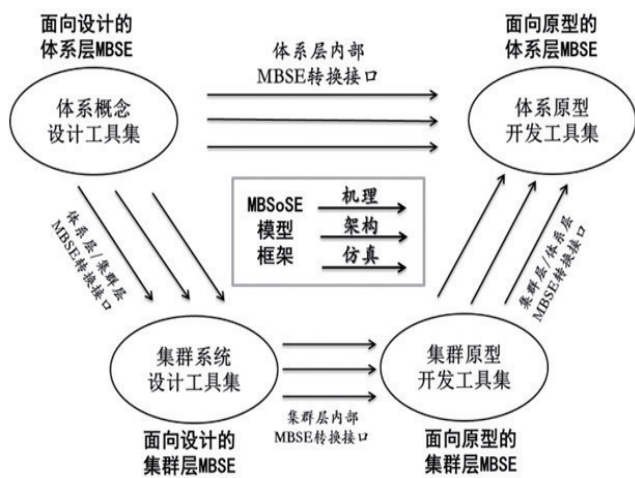


图10 面向MISoS的MBSE研究框架

虽然图10给出的MESoSE研究框架有一定的局限性,但其具有2个方面的有益启发。

#### 1) 关于体系层MBSE。

体系层MBSE的基本方法以面向DODAF/UPDM的SysML建模为主,MBSE在这方面有比较好的技术积累和研发经验可以借鉴。面临的挑战主要来自3个方面<sup>[25]</sup>:一是从MESoSE模型框架来看,体系层MBSE不仅要研究基于SysML的架构建模,还要研究机理建模和仿真建模,并实现3种模型的相互支持和相互贯通;二是面向设计和面向原型的体系层MBSE之间,以及体系层和集群层MBSE之间,都存在着机理、架构、仿真模型之间的连接和转换问题;三是从体系概念原型的智能化制造出发,需要把机理、架构和仿真建模与智能计算、智能优化、智能仿真结合起来,这对基于模型技术的发展提出与人工智能技相结合的新要求。

在体系工程流程建模方面,体系层流程建模不是独立存在的技术过程,而是一个跨层次、多面向的过程,这使得流程建模和产品数据管理变得更加复杂困难。另外,由于不同层次、不同面向的模型在建模仿真方法和模型范式及分辨率等方面的不同,体系层MBSE在仿真流程管理、仿真模型确认和验证方面,也将面临新的问题和挑战。

#### 2) 关于集群层MBSE。

对于集群系统而言,已有的MBSE方法和工具会得

到更好的利用和发展,达索等系统也会有新的用武之地。但如何把以往主要面向平台系统的工具和方法上升到多平台组网协同的集群层面,仍需经过多方面的努力。另外,无人集群分布在空中、陆地、海上和水下等多个领域,这就需要多领域、多专业MBSE之间在多集群之间的互联互通互操作。与MBSE相结合的单一平台的可视化系统,需要向多平台编组编队、多域联合指挥控制和大场景三维和VR显示的方向发展。

## 4 结论

随着体系研究的需求增长,MBSOSE的需求日渐扩大和增长,是一个值得开展的新的研究领域。MBSOSE研究应当以MBSE已有方法和工具为基础,同时要以体系研究为牵引,倡导跨专业、跨层次、多学科合作的MBSE研究与应用。

MBSOSE不是MBSE的自然渐进,而是需要新的科学视野和理论、技术创新。根据体系特有的复杂性特点,MBSOSE研究应紧密结合确定的应用领域,并基于一套先进的概念框架和体系理论,否则很可能会漫无边际或不得要领。

在MBSOSE发展初期,可以将其分为体系和类似于集群的多系统层面,体系层应把重点先放在体系架构和体系工程流程建模上,主要研究解决跨层次、多面向问题;系统层应充分借鉴已有MBSE成果,侧重解决多领域、多专业集成问题。

## 参考文献(References)

- [1] Williamson R C. Model-based systems engineering for systems of systems[J]. *Insight*, 2009, 12(4). doi: 10.1002/inst.200912412.
- [2] Williamson R C. INCOSE model based system engineering: System of systems and enterprise architecture activity[C]/INCOSE 2013 IW MBSE Workshop, 2013.
- [3] Fitzgerald J. Comprehensive model-based engineering for systems of systems[J]. *Insight*, 2016, 19(3): 59-62.
- [4] Hause M C. SOS for SoS: A new paradigm for system of systems modeling[C]/IEEE/AIAA Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2014.
- [5] Keis A. Model based architecting for evolutionary design of systems of systems (SoS)[C]. *EU KIC Urban Mobility/Challenges for Urban Mobility*, 2015.
- [6] Sousa-Poza A. System of systems engineering: An emerging multidiscipline[J]. *International Journal of System of Systems*

- Engineering, 2008, 1(1/2): 1.
- [7] Dahmann J. SoS pain points & implications for MBSE[C]//International Workshop on MBSE, Jacksonville, FL, USA, 2013.
- [8] Letourneau J P. Incorporating multi-criteria optimization and uncertainty analysis in the model-based systems engineering of an autonomous surface craft[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2009.
- [9] Whitcomb C. Model-based methodology for system of systems engineering with application to the development of the architecture for the unmanned vehicle sentry, faculty and researchers collection[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2009.
- [10] Peugeot T. MBSE, PLM, MIP and robust optimization for system of systems management, application to SCCOA French Air Defense Program[C]//Fanmuy G. Complex Systems Design & Management. Berlin: Springer International Publishing AG, 2017: 29-40.
- [11] Team MIW. Application of model-based systems engineering (MBSE) to compare legacy and future forces in mine warfare (MIW) missions[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2014.
- [12] Addington C D. Model-based methodology for system of systems architecture development with application to the recapitalization of the future towing and salvage platform[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.
- [13] Duffy M. A system-of-systems framework for the future hydrogen-based transportation economy[C]//INCOSE International Symposium, the Netherlands, 2008.
- [14] Hause M C. Using MBSE to evaluate and protect the electrical grid as a system of systems[C]//27th Annual INCOSE International Symposium, Adelaide, Australia, 2017.
- [15] Ring J. MBSE and System of systems for the intelligent enterprise: Application to supply and value chain management[C]//Proceedings of Conference on Systems Engineering Research (CSER) 2008, Los Angeles, CA, USA, 2008.
- [16] Madni A M. Model-based approach for engineering resilient system-of-systems: Application to autonomous vehicle networks[C]//Madni A M. Disciplinary Convergence in Systems Engineering Research. Berlin: Springer International Publishing AG, 2018.
- [17] Hause M C. Model-based system of systems engineering with UPDM[C]//20th Annual INCOSE International Symposium, Chicago, USA, 2010.
- [18] Sindiy O. V. Model-based system-of-systems engineering for space-based command, control, communication, and information architecture design[J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2010.
- [19] Helle P. From integrated architecture to integrated executable architecture[C]//19th IEEE International Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, Larissa, Greece, 2010.
- [20] Mittal S. Model-driven systems engineering for netcentric system of systems with devs unified process[C]//Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, 2013.
- [21] Acheson P. Model based systems engineering for system of systems using agent-based modeling[J]. Elsevier Science Direct Procedia Computer Science, 2013, 16: 11-19.
- [22] Vaneman W K. Defining a system of systems engineering and integration approach to address the navy's information technology technical authority[C]//Proceeding of the INCOSE International Symposium 2013, Philadelphia, PA, USA, 2013.
- [23] Kalawsky R S. Using architecture patterns to architect and analyze systems of systems, conference on systems engineering research, Atlanta, GA, USA[J]. Elsevier Science Direct Procedia Computer Science, 2013, 16: 283-292.
- [24] Bonanne K H. A model-based approach to system-of-systems engineering via the systems modeling language[D]. West Lafayette: Purdue University, 2014.
- [25] Nielsen C B. Systems of systems engineering: Basic concepts, model-based techniques, and research directions[J]. ACM Computing Surveys, 2015, 48(2): 18.

## MBSE from a system of systems point of view

WANG Weiping, ZHU Yifan, WANG Tao, LI Xiaobo

College of Systems Engineering, University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract** The research motivation for model-based system-of-systems Engineering (MBSOSE) is summarized. The current research progress and primary application areas of MBSOSE are reviewed, and the MBSOSE future development requirement is prospected. Secondly, the mainstream of techniques for current MBSOSE research and application are introduced from two aspects, the SoS architecture modeling and the SoSE process modeling. Finally, a research framework for multi-swarm intelligent SoSE is proposed under the background of intelligent unmanned combat application. The research requirement of MBSOSE is analyzed in detail, the research conception and developing strategy are presented from the viewpoint of both system-of-systems facet and swarm facet.

**Keywords** multi-swarm intelligent system of systems; systems engineering; model based systems engineering ●



(责任编辑 陈广仁)