

# 基于能力、架构中心的体系工程过程模型

刘俊先,张维明

国防科技大学信息系统工程重点实验室,长沙 410073

**摘要** 在分析体系工程过程模型及其不足的基础上,借鉴 MBSE 思想,把能力作为体系需求分析、设计和验证评估的不变量,以架构及架构原型作为勾连体系工程各项活动成果的抓手,提出一种体系工程过程环模型,并从时间、能力、架构3个角度对过程环模型进行了分析。

**关键词** 体系;体系工程过程;基于能力;架构中心;时间视角

IEEE 42010 标准《系统与软件工程-架构描述》将系统定义为一个被组织起来实现特定行为以完成一项任务的构件的组合<sup>[1]</sup>。而体系通常被认为是由系统构成的复杂系统,如 Jamshid<sup>[2]</sup>将体系定义为有限个体系成员的集成,这些体系成员各自独立可运行,在一定时间内链接在一起来完成特定的高层目标。构成体系的系统称为成分系统或体系成员系统,本文统一称为体系成员。体系成员组合在一起构成了更大的系统,执行单个体系成员独自完成不了的任务,这种现象就是涌现行为。

体系与一般系统或人工系统有许多相似之处,但在利益相关者、治理、业务环节、采办、测试、评估、边界、接口、性能、行为等方面存在诸多不同,这些不同之处使得面向人工系统的系统工程理论方法不再适用于体系研究和建设,具体体现为:(1)不能处理复杂系统问题中高层次的含糊和不确定性;(2)没有完全忽略上下文对系统问题阐述、分

析、求解的影响,但把上下文放到了背景中;(3)不准备在部署后再交付解决方案,这些解决方案包含迭代设计,或在实现上是不完整的。针对诸如此类的问题,研究人员提出体系工程的概念来取代系统工程,以处理体系这类对象的建设问题。

Keating<sup>[3]</sup>认为体系工程是对巨系统的设计、部署、运行和转型,使其如一个集成的复杂系统一样发挥作用并生成期望的效果。de Laurentis 等<sup>[4]</sup>认为体系工程是针对体系问题开发设计方案的流程集,应该对已有和新系统能力进行规划、分析、组织、集成,以形成超出单个体系成员能力的体系能力。总的来说,体系工程承认系统层和体系层的不同,在不同层次需要采用不同的系统工程方法,应实施均衡的技术管理,并采用开放、松耦合的架构。

欧盟自 2010 年开始资助了一系列体系理论与方法相关的研究,具体项目包括:(1) 2010—2014 年期间的 COMPASS (comprehensive modelling for

收稿日期:2020-04-15;修回日期:2022-02-15

作者简介:刘俊先,研究员,主要研究方向为指挥信息系统基础理论、军事需求与架构技术,电子信箱:18674864900@163.com

引用格式: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;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.06.010

advanced SoS)<sup>[5]</sup>、DANSE (designing for adaptability and evolution in SoSE)<sup>[6]</sup>以及 AMADEOS (architecture for multi-criticality agile dependable evolutionary open SoS)<sup>[7]</sup>; (2) 2011—2013 年期间的 ROAD2SoS (development of strategic research and engineering roadmaps in SoS)<sup>[8]</sup>和 T-Area-SoS (transatlantic research and education agenda in SoS)<sup>[9]</sup>; (3) 2013 年开始资助的 DYMASOS (dynamic management of coupled SoS)、LOCAL4GLOBAL (SoS that act locally for optimizing globally) 和 CPSoS (cyber-physical SoS)<sup>[10]</sup>。在美国, Sandia 国家实验室和卡内基梅隆大学软件工程研究所等机构也开展了一系列体系相关研究<sup>[11-12]</sup>, 特别是对超大规模体系进行了研究<sup>[13]</sup>。目前体系研究的挑战主要集中在体系表征与描述、体系理论基础、涌现、体系多层次建模、体系评估、体系架构的定义与演化、体系原型化、体系折衷等方面。

体系区别于系统的主要特征体现在 5 个方面<sup>[14]</sup>: (1) 业务独立性。每一个体系成员独立运行完成自身使命; (2) 管理独立性。每个体系成员被独立管理, 自行决定按被组合时不曾预期的方式进行演进; (3) 地理分布性。体系成员在地理上是分离的, 成员间仅交换信息, 不交换物质和能量; (4) 演进性开发。体系作为一个整体随时间而演化, 以响应体系成员和业务环境的改变; (5) 涌现行为。新行为涌现自体系成员的交互。体系成员是独立演化的, 因此涌现行为可能是短暂存在的。

根据上述特征特别是基于业务独立和管理独立程度的不同, 体系通常被分为 4 类<sup>[15-16]</sup>: (1) 集成体系 (directed SoS)。体系实施集中管理, 体系成员是为满足体系特定目标而采购或开发的。体系成员具备独立运行的能力, 但是其实际运行服从体系集中管理。美陆军曾计划开发的未来作战系统 (future combat system, FCS) 可认为是一个集成体系。(2) 集合体系 (acknowledged SoS)。体系实施集中管理, 但是体系成员在松散从属关系下运行 (保留各自独立的所有者关系)。弹道导弹防御系统就是一个集合体系。(3) 协作体系 (collaborative SoS)。体系中没有集中管理, 但是体系成员就完成

统一使命任务自愿达成一致, 在体系统一政策规定下运行。(4) 虚拟体系 (virtual SoS)。体系没有集中管理或一致统一的使命, 体系成员在各自 (可能共享的) 政策约定下运行。美军全球信息栅格 (global information grid, GIG) 就是一个虚拟体系。

集成体系通常集中管理程度较高, 可以看成是一个规模更大的复杂系统, 系统工程理论与方法可以用于该类体系的设计与建设。集合体系、协作体系和虚拟体系的集中管理程度依次降低, 应用传统系统工程过程和相关技术开展体系设计与建设, 如扩展的系统工程过程 V 模型等, 已不再满足要求。本文主要以集合体系为研究对象, 研究相应的体系工程过程模型, 明确主要体系工程活动, 以为实际体系规划和建设提供参考。

## 1 体系工程过程模型及其改进思路

### 1.1 几种典型的体系工程过程模型

有研究将体系工程从内容分为体系需求工程、体系集成与构建工程、体系演化工程, 参考 MIL-STD 499B 的系统工程过程模型提出了一种体系工程过程模型 (图 1)<sup>[17]</sup>, 包含需求分析循环、设计分析循环、设计验证循环、体系环境与边界分析 4 个子过程, 这 4 个子过程通过体系分析与控制活动进行平衡, 通过平衡找到体系设计的合适方案。

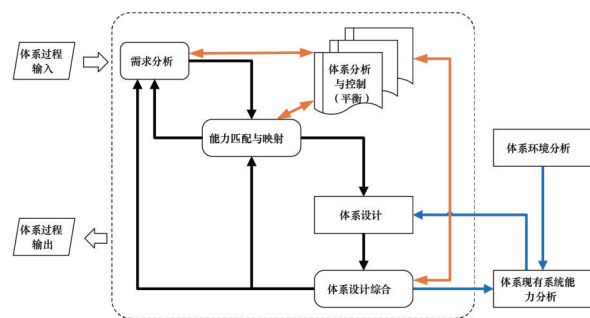


图1 体系工程过程模型

作为系统的体系成员在建设时采用系统工程过程模型, 除了 MIL-STD 499B 的模型, 图 2 所示的“Vee”模型也是一种常用模型。“Vee”模型包含概念开发、需求工程、系统架构、系统设计与开发、系统集成、测试评估、试验维护等阶段。

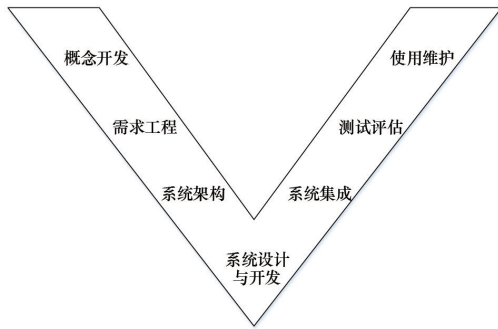


图2 系统工程过程的V模型

因此体系工程过程与系统工程过程间天然就有紧密的联系,一项复杂的体系工程过程中包涵有众多的系统工程过程,体系工程与系统工程存在包

涵与被包涵的关系。因此多数研究采用扩展系统工程过程“Vee”模型的方法来建立系统工程过程和体系工程过程的综合模型,如图3<sup>[17]</sup>和图4<sup>[18]</sup>所示。

### 1.2 现有体系工程过程模型的不足

国际系统工程协会(International Council on Systems Engineering, INCOSE)提出了关于体系的7项挑战:体系成员独立运行;体系成员有不同的生命周期;复杂性(随着系统数量的增加,系统交互的复杂性非线性增长;接口标准冲突或缺失使得定义跨体系成员的接口的数据交换极其困难);初始体系需求含混不清;管理可以使工程黯然失色;模

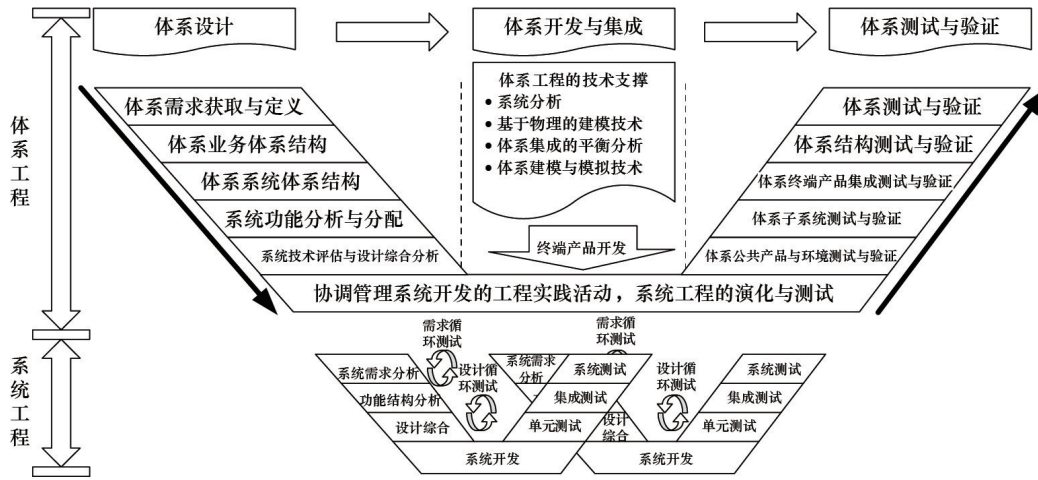


图3 体系工程过程与系统工程过程

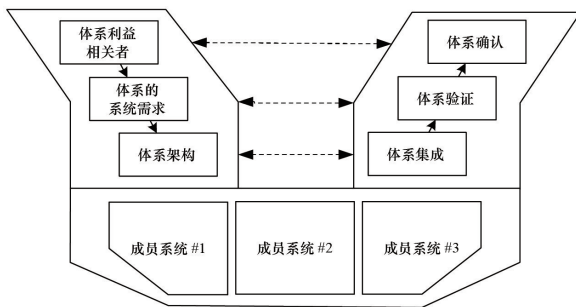


图4 一种体系工程过程模型

糊边界带来混乱;体系工程永不终结。目前的体系工程过程模型主要面向集成体系,在解决上述体系的共性挑战方面还存在不足,主要体现如下。

1) 能力需求分解时的隐性弱化问题。根据体系需求分析和设计确定体系成员(系统)时,通常采用“能力-功能”映射的系统工程思路,见图3中体系设计阶段体系工程层面的主要活动和图4中左上侧的活动。这样的处理实际上隐含了下述假设:具备一定功能(记为Funcs)的系统能够提供一定的能力(记为Cap),而且能够提供能力Cap的系统必然具备功能Funcs。按照能力的定义,可能存在不同功能的系统,但是都能够提供Cap能力。按原先的思路进行设计和处理,实际上人为的缩小了体系设计空间,或缩小了能够满足能力要求的体系成员的范围,这就造成了能力需求在分析设计过程中的

隐性弱化。

2) 缺乏统一的抓手衔接和牵引各阶段工作内容。现有体系工程过程模型由传统基于文档的体系工程过程(document based system engineering, DBSE)模型拓展而来,不可避免的会继承传统基于文档的体系工程方法的部分缺点,即通过各种论证报告、设计报告、分析报告、试验报告等文档把体系工程各阶段的信息集成在一起,费时费力且容易出错,关联追踪性差,变更影响分析困难,不便交流。

3) 过程性的流程模型难以反映体系工程永不终结、体系成员灵活进出等特点。

### 1.3 体系工程过程的改进思路

针对上述问题和不足,结合体系特点和体系工程需求,借鉴基于模型的系统工程、数字孪生等技术和方法,提出改进体系工程过程模型思路。

1) 把能力作为体系需求分析、设计和验证评估的不变量。

数学上,不变量用于区分不同的数学对象,刻画对象自身的性质,如:曲率是等距变换下的不变量,可以区分球面和平面;纽结不变量用于区分纽结;在相似意义下,初等因子组用于区分复方阵等。系统的组成及关系在不考虑更新或升级时,可以认为是系统的不变量,是开展系统分析、设计、评估等研究的基础。对体系而言,(物理上的)组成显然不再是不变量,因为体系成员可以动态的加入或退出体系。一般系统用系统功能来描述用途或作用,对体系,可以认为体系能力发挥着类似系统功能的作用,也就是把体系能力看作是一种不变量,用于体系的设计、分析、规划、构建等活动。

已有体系工程过程模型的需求隐性弱化问题本质上是没有盯住能力这一不变量,而是在一些环节把能力转换结果(如功能)来代替能力作为不变量。但是在能力转换中却忽视了能力与功能不是一对一的映射关系,从而造成需求隐性弱化、设计空间缩小等问题。为了消除这一问题,就需要在体系需求阶段转向体系设计阶段时,仍以能力作为选择/设计系统的不变量,在体系集成验证评估和演化阶段,把能力作为各项工作的度量标准。

2) 以架构及架构原型作为勾连体系工程各项

活动成果的抓手。

2007年,国际系统工程学会提出基于模型的系统工程(model based system engineering, MBSE),通过模型支持需求分析、系统设计、验证、确定、评估等活动,覆盖过程研制的全生命周期。MBSE采用规范的方法和过程进行形式化建模,可以提高设计准确性,支持系统设计集成,支持持续验证和确认来降低复杂度,增强设计者与开发者的联系。

借助MBSE的思想, Borky和Bradley<sup>[19]</sup>将架构与传统系统工程过程各阶段关联起来,使架构模型为系统工程各项工作提供支持,如图5<sup>[19]</sup>所示。

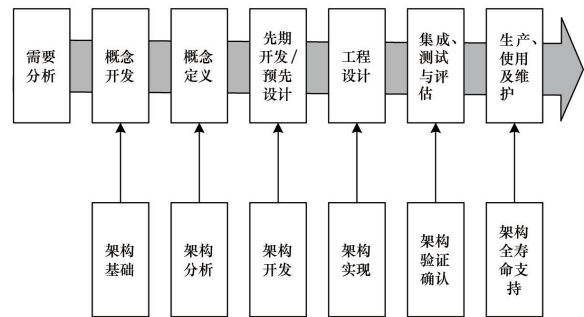


图5 架构对传统系统工程的支持

研究中采用架构模型及孪生模型思想链接体系工程过程各阶段活动,在不同的阶段,采用架构模型及同构一致的架构原型等多种形式,使体系工程过程各阶段成果实现内在关联、一致。

## 2 基于能力、架构中心的体系工程活动

### 2.1 体系能力需求分析

需求通常来自作战需要和作战概念,是设计和开发的输入,是验证的主要输入,因为测试必须能够追溯到特定需求,以确定系统是否按期望运行。对体系而言,体系需求主要体现为能力需求,这里的能力需求是支持体系完成使命任务预期所需要能力的集合。能力需求分析就是根据体系使命任务确定体系能力需求,这些需求是体系规划和设计的基础。能力需求中的能力有些是体系已经具备的,有些则是体系不具备的,需要通过体系规划、设计、建设来补充完善。

能力需求的来源有3条途径:(1)来自战争设计,即面向未来可能的作战需要,创新作战概念和装备体系,提出对体系的能力需求;(2)来自实际用户,即用户当前在体系运行中遇到的不能满足需要的能力差距;(3)来自技术推动,即技术发展引起装备颠覆性变革,进而影响作战样式。

## 2.2 体系规划

体系规划是指综合分析体系能力需求和实现可能性,确定体系发展的能力目标,确定能力发展里程碑并制定能力发展规划。具体工作包括:(1)明确当前体系能力现状,建立体系能力发展的基线;(2)针对能力需求,充分考虑可行性和费效比等因素,确定体系能力目标;(3)分析体系能力目标实现相关的投资管理、资源分类、规划评估等问题,确定大概的体系能力实现方案;(4)确定体系能力发展的里程碑节点,制定体系能力演进规划。

## 2.3 体系设计

体系设计是指根据体系能力目标和发展规划,确定构成体系的逻辑成员系统及其提供的能力,明确逻辑成员系统间可能的交互关系,设计体系成员系统联合完成体系各项使命任务的业务过程。具体工作包括:(1)确定体系包含的逻辑成员系统,这里的逻辑成员系统是指从能力和业务流程的角度定义的系统,通常可以对应到一类实际系统,这些系统组成、功能和性能参数可能有差异,但都具有类似或相同的能力;(2)将体系能力映射关联到体系逻辑成员系统,即根据体系能力与逻辑成员系统的能力进行匹配映射,确定由哪些逻辑成员系统来提供相应的体系能力;(3)根据体系能力与逻辑成员系统的映射关系,分析体系成员间可能的交互关系;(4)设计体系逻辑成员系统完成体系使命任务的典型模式。

## 2.4 体系建设

体系建设就是根据体系设计结果开展体系成员系统的研制、改造等工作,实质上是将逻辑成员系统进行物化落地。主要工作包括:(1)新体系成员系统的论证、设计、研制开发、测试,通常采用系统工程方法完成;(2)遗留系统的匹配、改造和升级,使其具备对应逻辑成员系统的能力;(3)完成

体系规章制度拟制、标准规范制定、训练、人才培养教育等非系统研制类工作。

## 2.5 体系集成验证评估

体系集成是协调统一体系成员系统的活动,以实现期望的整体行为,满足预定的需求。体系建设是现有系统的重用与改进以及新系统的规划,而体系集成是体系应用的核心工作。体系成员系统的重用性和体系层的涌现性是体系集成要重点关注的核心特征。由于体系成员系统的复杂性,体系集成并不是一种简单的即插即用,而是增量式的、循环的迭代过程,在反复迭代过程中,通过测试、调整和改进体系的成员系统及接口,直到实现期望的整体行为结果。

体系验证与确认是评测体系成员系统是否具备逻辑成员系统能力要求、满足体系能力需求、按体系设计的业务模式完成任务的活动。体系验证与确认重视成员系统变化的风险,这些变化或许是为支持体系目标而计划的,也可能是成员系统独自计划的。在测试确认中,要向实际体系进行反馈,以评估体系整体性能,识别作战问题和(非期望的)涌现行为。体系验证确认时通常从真实作战环境中获得数据,但在体系没有完全建成时也可以通过体系架构原型来开展工作。体系验证确认需要周期性开展,但未必与体系更新循环绑定。

体系建设阶段提供的各建设内容,必须进行体系评估后,才能正式加入到体系中。体系评估不是对待加入体系对象的性能、效能进行验证评估,而是关注待加入体系对象进入体系后对体系能力的影响和提升。体系能力的概念是广义的,不仅包含指挥控制、作战、侦察、保障等功能性能力,也包含韧性、适应性、灵活性、互操作性等非功能性能力。

## 2.6 体系协同演化

体系演化就是对现有体系的改造和调整,使体系具备新的能力,适应新环境,履行新使命。体系演化的驱动力包括内部因素和外部因素,内部因素主要是体系组成变化,外部变化主要指环境变化。

体系演化分为成员演化和结构演化。体系能力演化导致体系成员的加入和退出,这些演化之间存在互动联系,高层演化驱动底层演化,底层演化

导致高层成员的变化,如体系使命任务的调整,可能需要加入新的成员和淘汰原有成员;预警侦察系统等的加入或退出,会导致防空体系能力、任务的变化。体系运行结构的变化一方面是由于体系成员演化导致体系运行结构的演化;另一方面,虽然体系成员不变,但是任务、环境等变化,也需要体系运行结构发生演化。

### 3 体系工程过程环模型及多视角分析

#### 3.1 体系工程过程环模型

提出图6所示的体系工程过程环模型,包括体系能力需求分析、体系规划、体系设计、体系建设、体系集成验证评估、体系协同演化6类活动。6类活动构成一个螺旋式环路,表示体系工程过程永无终结。任何时候根据根据需要可以启动体系能力需求分析活动,通过增量式的设计、开发和部署运用,实

现全部的体系能力目标。

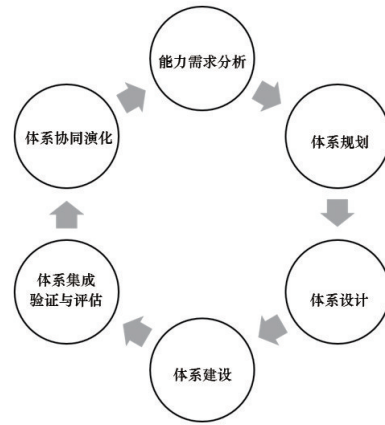


图6 一种体系工程过程环模型

#### 3.2 体系工程过程环的时间视角分析

当前体系理论已经逐渐用动态、迭代的观点来研究体系工程过程。图7是史蒂文斯理工学院系统工程研究中心在“体系的灵活智能学习型架构”项目中提出的Wave模型<sup>[20]</sup>。

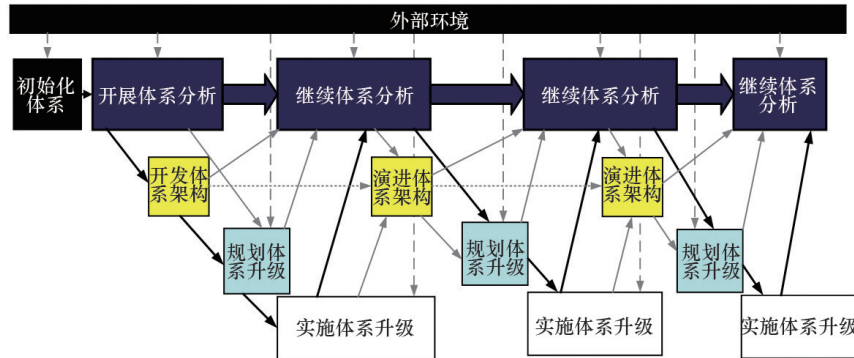


图7 体系初始化、过程与演化的Wave模型

DANSE项目也提出一个体系生命周期模型,如图8<sup>[6]</sup>所示,该模型从体系行为建模、运行、能力演进等方面描述了随着时间的变化,体系从初始阶段进入创建阶段再到连续运行阶段的主要活动及其关系,模型也体现了体系工程与成员系统工程的界面关系。能力演进循环反映了DANSE模型提出的体系“演进修正”特性,即体系管理者定义对体系的潜在需要,探索可能的架构变更,并将这些变更影响和落实到成员系统的设计中。

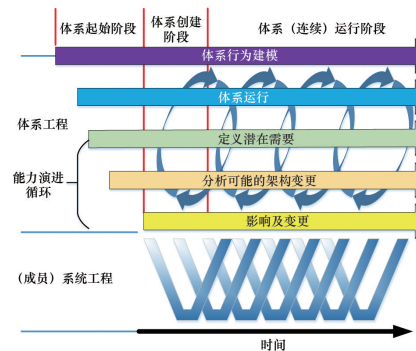


图8 DANSE体系工程生命周期模型

从上面2个模型可以看出体系工程过程是一个不断迭代的过程,在体系生命周期内永不终结。将图6所示的体系工程过程环模型在时间轴上展开,可以得到图9所示的模型。在初始化阶段后,阶段一是体系首次构建阶段,从阶段二开始体系进入演进和升级阶段。前一阶段的集成验证评估与协同演化控制的结果,是后一阶段的规划和设计的

输入与需求,因此它们密切相关。体系规划是一项重要的体系工程活动,其结果与体系设计、集成验证评估、协同演化以及下一阶段的能力需求分析直接关联。“体系规划—体系协同演化—体系规划—体系协同演化……”是体系发展的一条重要脉络,体系规划明确体系发展的目标和方向,体系协同演化是引导和控制体系向着这个目标发展。

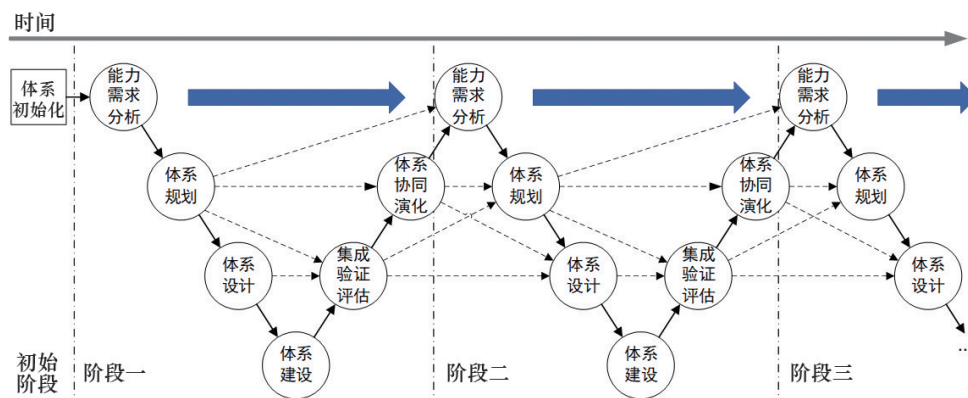


图9 时间视角下的体系工程过程环

对比分析图7、图8和图9的模型,可见它们的基本思路是相似或一致的,区别在于各自强调的重点不同。Wave模型把架构设计和演化作为主线,把体系规划界定为体系建设升级的规划计划。DANSE模型强调“演进修正”。本过程环模型则强调体系规划与计划在其生命周期中的重要作用。

### 3.3 体系工程过程环的能力视角分析

能力作为体系设计与建设管理的不变量,在体系工程过程的不同活动阶段的具体体现是不同的,具体体现为能力需求、能力规划、能力配置项、成员系统能力、能力评估指标和能力状态等形式,其关系如图10所示。

能力视角下体系工程过程各项活动间存在以下关系。

1) 能力需求与体系能力需求分析活动对应。它是后续分析设计的基础。根据能力需求可以确定体系目标,进而将体系目标分解为体系能力,这是开展体系能力规划的输入和基础。根据能力需求还可以确定体系任务效能指标,这是构建体系验证评估指标的一项输入。

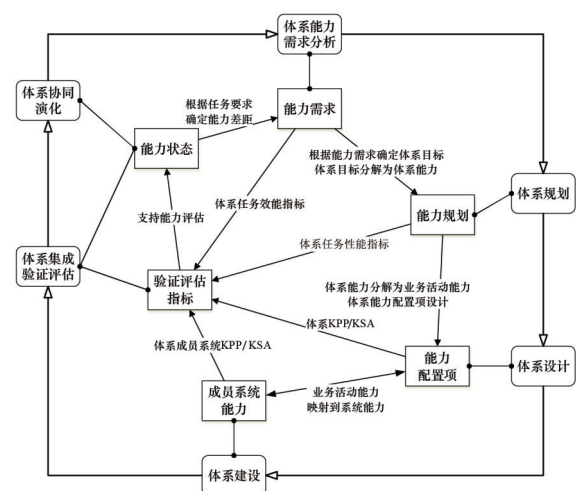


图10 能力视角下的体系工程过程环

2) 能力规划与体系规划活动对应。它承接自能力需求,一方面可以将能力规划中的能力分解为业务活动能力,支撑体系能力配置项的设计;另一方面能力规划中各里程碑节点的能力要求是确定体系任务性能指标和验证评估指标的输入。

3) 能力配置项与体系设计活动对应。它是能力及支撑能力实施的规章制度、组织机构、人力力

量、基础设施、标准、训练等内容的综合体。能力配置项是提取体系关键性能参数(key performance parameter, KPP)和关键体系/系统属性(key system / system of systems attribute, KSA), 建立验证评估指标体系的另一项输入。

4) 成员系统能力与体系建设活动对应。它与能力配置项中的业务活动能力通过映射建立关联, 成员系统能力也是提取成员系统 KPP 和 KSA 以完善验证评估指标的输入。

5) 验证评估指标与体系集成验证评估活动对应。它是开展体系集成、验证、确认和评估工作的基础, 指标体系的构建与能力需求、能力规划等密切相关。

6) 能力状态与体系协同演化和体系集成验证评估活动对应。它是体系能力水平的具体体现, 是预测能力发展的基础, 是分析能力差距、确定能力需求的输入, 能力状态与验证评估指标一起可以支持能力评估工作。

### 3.4 体系工程过程环的架构视角分析

架构通常被认为是系统工程的一个简单产出物, 包含的最终设计信息有限。现在大家已经普遍形成了共识, 认识到架构是系统开发流程的核心, 在将用户需求转换为有效解决方案的过程各阶段都发挥着十分重要的作用。架构中心的体系工程过程是指在体系工程过程各项活动中, 采用架构技术和统一的架构规范建立适合的架构及架构原型, 并通过架构及架构原型为各项工作提供支撑, 辅助各类用户的相互理解及交流。

架构中心的体系工程过程设计的不同形式或类型的架构包括需求架构、能力架构、顶层架构、系统架构和架构原型, 它们之间的关系及与各项体系过程活动的对应如图 11 所示。

架构视角下体系工程过程各项活动间存在以下关系。

1) 能力需求分析活动生成需求架构。需求架构从多个视角描述体系要完成的主要使命任务、典型的完成模式和流程、任务执行中的信息交互, 分析体系完成使命任务应该具备的能力和体系当前具备的能力, 计算体系能力差距得到体系能力需

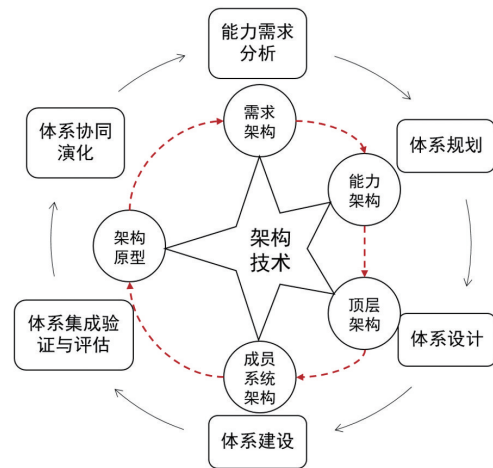


图 11 架构视角下的体系工程过程环

求, 并建立多种形式的架构模型, 采用多视图方法组织起来。

2) 体系规划活动形成能力架构。能力架构是对能力体系组成、能力效果和指标、能力目标、能力关系、能力演进计划及阶段等的描述。需求架构是能力架构的一项输入。

3) 体系设计活动完成顶层架构开发。顶层架构从体系层面描述体系逻辑成员系统的组成、能力、关系、主要业务活动、交互、关键性能参数、接口等内容, 并根据能力架构中能力演进计划确定体系逻辑成员系统的演进路径。

4) 体系建设活动中开发成员系统架构。成员系统架构是对成员系统能力、组成、结构、功能、性能及设计和演进原则的描述。成员系统架构设计的边界和输入来自体系顶层架构。

5) 体系集成验证评估和体系协同演化活动与架构原型相关。架构原型是采用可执行模型、数字孪生、高性能计算等技术和客观物理原理建立的虚拟原型。架构原型中既包括了体系组成、结构和行为的运行模型, 也包括物理作用机理、环境影响、作战任务、体系成员行为的运行模型。通过虚拟的架构原型可以大大扩大架构折衷分析空间, 更快地探索发现关键性能参数, 并支持通过虚拟交战来评估体系任务效能, 降低费用、提高效率。

6) 需求架构、能力架构、顶层架构、体系成员架构和架构原型是遵循统一的架构技术来开发的。

这里统一的架构技术包括架构框架、通用参考资料、架构框架元模型、架构原型化技术等。

架构中心的体系工程过程能够通过系列架构的开发和转换,实现从用户需求到交付解决方案的严格追踪,实现体系工程各阶段模型的精准化和无二义性。通过不同层次架构内容抽取和可执行仿真,可解决设计、评估等用户关心的问题。好的架构模型能够在所有架构方案中进行使用,因为相对于实际系统其费用更低。架构中心的体系工程过程支持架构演化中架构设计模型、物理原型、虚拟原型的关联,因此成体系的架构模型支持对现有或新设计架构的分析与优化,也支持体系响应未来需求、作战环境等因素变化而发生演化后的评估。

## 4 结论

论文借鉴 MBSE 思想,从能力和架构 2 个着眼点入手,紧贴集合体系的特点和体系工程的需求,提出一种体系工程过程环模型,并从时间、能力和架构视角对其进行了深入分析。体系工程过程环中能力需求分析、体系规划和体系设计在内涵上可能还存在一些重叠冗余处,有待进一步研究改进。

体系工程过程模型落地实施的关键是对体系架构进行创新定义,虽然 INCOSE 已经提出了最新的统一架构框架 UAF(unified architecture framework),但是用于集合体系规划设计时还不完全适用。必须通过研究明确体系架构描述的主要视角和视角模型,把体系工程过程环中每一项活动与体系架构视角模型具体关联起来,并探索相关体系架构模型的开发顺序和开发方法。基于体系工程活动对应的不同形态架构,进一步定义能力及相关度量指标。

### 参考文献(References)

- [1] ISO/IEC/IEEE 42010. Systems and software engineering—architecture description[S]. Geneva, Switzerland, IEEE, 2011.
- [2] Jamshidi M. Systems of systems engineering—principles and applications[M]. USA: CRC Press, 2008.
- [3] Keating C B. Research foundations for system of systems engineering[C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Waikoloa, Hawaii, USA, 2005: 2720–2725.
- [4] de Laurentis, Daniel A, Robert K C. A system-of systems perspective for future public policy[J]. Review of Policy Research, 2004, 21(6): 829–837.
- [5] COMPASS: Comprehensive modelling for advanced systems of systems[EB/OL]. [2022–03–19]. <https://cordis.europa.eu/project/id/287829>.
- [6] DANSE: Designing for adaptability and evolution in system-of-systems engineering[EB/OL]. [2022–02–19]. <https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2013/system/TH16282Honour.pdf>.
- [7] AMADEOS: Architecture for multi-criticality agile dependable evolutionary open system-of-systems[EB/OL]. [2022–02–19]. <https://www.hipeac.net/network/projects/6812/amadeos>.
- [8] Road2SoS: Development of strategic research and engineering roadmaps in systems of systems engineering and related case studies[EB/OL]. [2022–02–19]. <https://www.hipeac.net/network/projects/6836/road2sos/?msclkid=f4ee8599a76511ec8e68fec147216e33>.
- [9] T-AREA-SoS: Trans-atlantic research and education agenda in system of systems[EB/OL]. [2022–02–19]. <https://www.hipeac.net/network/projects/6833/t-area-sos/?msclkid=972b01e0a76611ec9e6c0d93fdcdc33e>.
- [10] CPSoS: Cyber-physical systems of systems[EB/OL]. [2022–02–19]. <https://www.hipeac.net/network/projects/6817/cpsos>.
- [11] Sandia National Laboratories. A roadmap for the complex adaptive systems of systems (CASoS) engineering initiative[R/OL]. [2022–02–19]. [https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/141/2022/02/CASoSEngineeringRoadmap\\_09.22.08.pdf](https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/141/2022/02/CASoSEngineeringRoadmap_09.22.08.pdf).
- [12] US software engineering institute system of systems engineering collection[EB/OL]. [2022–02–19]. <https://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=509523>.
- [13] Peter H F, Kevin S, Kurt C W, et al. Ultra-large-scale systems: The software challenge of the future[M]. USA: Software Engineering Institute-SEI/CMU, 2006.
- [14] Maier M W. Architecting principles for system-of-systems[C]//6th International Symposium of INCOSE, Boston, MA, USA, 1996: 567–574.
- [15] Firesmith D. Profiling systems using the defining charac-

- teristics of systems of systems (SoS)[R]. SEI Technical report: CMU/SEI-2010-TN-001, 2010.
- [16] Maier M W. Architecting principles for systems-of-systems[J]. *Systems Engineering*, 1998, 1(4): 267-284.
- [17] 张维明, 刘忠, 阳东升, 等. 体系工程理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 34-36.
- [18] Hoehne O. The SoS-VEE Model: Mastering the socio-technical aspects and complexity of systems of systems engineering (SoSE) [J]. *INCOSE International Symposium*, 26(1), 2016: 1494-1508.
- [19] Borky J M, Bradley T H. *Effective model-based systems engineering*[M]. USA: Springer International Publishing AG, 2019.
- [20] Cihan H D. Flexible and intelligent learning architectures for SoS (FILA-SoS) [EB/OL]. (2015-12-03)[2022-3-24]. [https://sercuarc.org/wp-content/uploads/2018/08/Dagli\\_SSRR-DEC-3-2015.pdf](https://sercuarc.org/wp-content/uploads/2018/08/Dagli_SSRR-DEC-3-2015.pdf).

## Capability-based architecture-centric process model for system of systems engineering

LIU Junxian, ZHANG Weiming

Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract** With the transformation from the traditional document-based systems engineering (DBSE) to the model-based systems engineering (MBSE), it becomes more and more difficult for the "Vee" process model of the DBSE to reflect the characteristics and the requirements of the system of systems (SoS) engineering. Based on the analysis of the SoS engineering (SoSE) process models and their shortcomings, this paper takes the capability as the invariant feature in the system requirement analysis, the design, the verification and the evaluation. The architecture with its prototype is selected as the connector of all activities of the SoSE. A ring model for the SoSE process is proposed and analyzed from the viewpoints of the time, the capability and the architecture. The results of this paper could be used for understanding the SoSE process, establishing the architecture-centric SoSE theory and guiding the SoSE practice.

**Keywords** system of system; SoS engineering process; capability-based; architecture-centric; time viewpoint ●



(责任编辑 祝叶华)