

# 体系工程“钻石”模型与数智孪生

曹江, 陈彬, 高岚岚, 平洋, 樊志强

军事科学院战争研究院, 北京 100091

**摘要** 基于复杂事物演化发展的视角, 阐述了体系的产生背景与概念定义, 分析了体系概念里主体、关系与环境的内涵, 并对系统与体系进行了比较。阐述了对体系工程的认识与概念定义, 提出体系工程“钻石模型”方法与基于信息活动的体系结构框架, 介绍了其基本内涵、实施过程与治理机制。基于现代科技发展趋势, 提出了数智孪生概念框架, 阐述了数智孪生的内涵意义, 探讨了数字智能时代体系工程的发展方向。

**关键词** 体系; 体系工程; 钻石模型; 数智孪生

随着科学技术发展, 在大量的信息化实践过程中, 人们越来越多地遇到社会融合带来的新问题, 条理清晰、结构固化、过程明确、规则完善的世界正转变为形态多样、边界模糊、多域协作、按需组合、变化难测的世界。这类模糊、柔性、多态、演化和不确定的复杂现象, 可称之为“体系”现象。

体系(system of systems, SoS)概念的提出可以追溯到20世纪50年代<sup>[1-2]</sup>。虽然经过多年研究, 但人们对体系尚未达成完全统一的认识, 不同研究人员或组织对体系的定义还存在一定程度上的差异<sup>[3]</sup>。分析认为, 体系概念是对系统思想的延伸、拓展与创新, 它为人们呈现了更高级别、更广范围、更加多元的视角, 阐述了独立系统之间、诸多系统与所处环境之间的复杂关系、相互作用及深刻影响。为更加清晰明确地理解研究体系, 本文采用集

合论方法对体系概念进行了定义, 并对其中包含的主体、关系与环境的内涵意义进行了分析探讨。

另一方面, 传统的系统工程理论方法在面对体系问题时难以为继, 大规模复杂工程实践需要新的思想和理论指导, 体系工程(system of systems engineering, SoSE)应运而生<sup>[4]</sup>。但从现有研究来看, 体系工程与系统工程之间的关系还不够清晰, 体系工程的落脚点更多地被放在系统建设上, 缺乏对体系工程各个环节的整体布局, 难以充分体现其特性与进步所在。分析认为, 体系工程是体系思想在工程领域的实践应用, 它需要用复杂性科学的思想 and 理论去认识、研究与解决愈加庞大、复杂的工程实践中出现的新问题, 以应对传统系统工程方法难以应对的新挑战, 如动态性、模糊性、演进性与涌现性<sup>[5]</sup>等。体系工程不应该是系统工程简单的堆积、叠加

收稿日期: 2020-04-17; 修回日期: 2020-05-12

作者简介: 曹江, 研究员, 研究方向为信息系统与体系工程, 电子信箱: caojiangemail@126.com; 陈彬(共同第一作者), 助理研究员, 研究方向为体系工程与人工智能, 电子信箱: binchen\_ams@163.com

引用格式: 曹江, 陈彬, 高岚岚, 等. 体系工程“钻石”模型与数智孪生[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 6-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.21.001

和局部改良,它应是为解决体系现象而专门创新形成的工程方法与技术。本文结合对体系的长期研究和工程实践,给出了有关体系工程基本概念的定义,阐述了体系工程的主要特性以及其与系统工程的区别和进步所在,提出了一种契合体系工程特点的新方法模型——“钻石”模型,并对其内涵、过程和机制等进行了探讨。

体系与体系工程是多领域、跨学科的综合性和研究方向<sup>[6]</sup>,它处于自然科学和人文科学的交叉位置,将随着相关领域科学技术的发展而与时俱进、不断创新。当前,以人工智能、数字孪生<sup>[7-11]</sup>等为代表的新一代信息技术与现代脑科学、生命科学等正成为新一轮数字化、网络化、智能化深度融合创新发展的核心驱动。这样一种战略性、持续性和创新性的融合发展将催生出孪生于现实世界、可超前演进的数字智能虚拟世界。未来的体系将横跨贯通物理世界与数字世界,二者深度融合共同演进,体系将拥抱虚拟实在。受数字孪生、人工智能等前沿技术的启发,本文提出体系工程“数智孪生”概念,对其内涵意义进行讨论分析,并展望数字智能时代的体系与体系工程发展方向。

## 1 体系概念定义

针对体系现象以及信息时代复杂的社会融合问题,体系概念需进行深入研究,通过把握体系的概念内涵深入理解体系现象,探讨有效应对、解决体系问题的体系工程方法论。

### 1.1 系统概念

令 $A$ 表示系统 $S$ 中全部元素构成的集合, $R$ 表示系统 $S$ 中全部元素之间关系的集合,且 $A$ 中不存在相对于 $R$ 的孤立元素,则系统 $S$ 可形式化地定义<sup>[12]</sup>为

$$S = \langle A, R \rangle \quad (1)$$

该定义表明系统由元素集合与关系集合共同决定。其中,系统元素以及元素之间交互关联方式的综合称为系统结构。当系统处于构想或构建状态,系统结构可称为框架结构。当系统处于运作状态,系统元素及其相互关系处于动态过程时,系统

结构可称为运作结构。式(1)未体现出具体的系统结构,是对系统概念最一般的定义。

此外,系统的关键特征之一是有明确或相对明确的边界,即将系统与其所处环境分开的界面。内外分明并与所处环境相互作用是系统的重要特性。系统之外的一切与其相互关联的事物构成的集合,称为该系统的环境。即系统 $S$ 的环境 $E$ 是指 $S$ 之外一切与 $S$ 具有不可忽略的联系事物集合,系统环境 $E$ 可表示<sup>[12]</sup>为

$$E = \{x | x \notin S, \text{且与} S \text{有不可忽略的联系}\} \quad (2)$$

系统科学的一个重要方面是用系统观点去认识环境,认识到系统的环境也有或强或弱的系统性。把环境当作系统来分析,是系统观点的必要组成部分<sup>[12]</sup>。

随着信息技术的快速进步与系统理论的实践发展,人们逐步认识到实际上很难存在一个完备的系统,每个系统在某些方面都可能依赖于一个更大的系统,任何系统都可以是更大环境中的一个组成部分,并与其他组成部分相互关联与影响。体系便是将关注的事物及其之间的关系放到与环境互动的大整体中去考虑。

### 1.2 体系概念

社会信息化进程的加速,使得系统与系统、系统与环境之间更大规模、更加广泛、更为密切地联系在一起,彼此间的交互协作或竞争对抗愈加频繁和深入,由此产生了很多带有复杂生态的事物,体系现象逐渐凸显,人们的认识也逐步从系统概念向体系概念演化。

在研究体系现象的过程中可以发现,许多事物的结构和边界会随环境不断变化。从结构上分析,复杂事物的主体会随环境重构、创生或消亡,主体之间的关系亦可能随环境产生变化。从边界上分析,复杂事物的边界愈加难以划分,它随着使命任务、自然条件或认识的深化在动态环境中时刻变化。系统主体对环境产生着巨大影响,系统主体与环境之间是紧密的互动关系,从更高层次的视角来看,它们共同构成了更为庞大、复杂的事物。为了更好地认识这些新质复杂现象和特征,体系概念应运而生。此处需要强调的是,用“主体”替代第1.1

节所述的元素,旨在强调体系组成具有主动性、目的性、自治性等能动性特征。

下面采用集合论方法定义体系。令 $A^*$ 表示体系内所有主体的集合,且主体具有自主性、可变性(创生、演化、消亡、突变)、分散性(时间分散、空间分散、管理分散)等特征。令 $R^*$ 表示主体集合 $A^*$ 的所有主体间关系的集合,且关系适应可变。令 $E^*$ 表示联合体 $\langle A^*, R^* \rangle$ 之外一切与之具有不可忽略的联系的事物集合,可理解为主体所处的环境。那么,体系 $S^*$ 可形式化地定义为

$$S^* = \langle A^*, R^*, E^* \rangle \quad (3)$$

式(3)是对体系概念最一般的定义,表明体系是主体集、关系集与环境集的复合体。

## 2 对体系的理解

体系相较系统而言,最大的不同在于打破系统边界,将原本边界之外的环境纳入更大的整体进行考虑,并由此可更为深刻地理解体系。

### 2.1 主体、关系与环境

在体系概念中,将术语“元素”变为“主体”并不是简单的名词变更。第一,元素、单元、部件等词汇通常隐含或倾向于固有、静态、分类从属等含义,而主体是主动的、鲜活的、自治的、有目的的,体现出体系构成要素能够具有活力这一基本内涵。体系中的主体可能是简单元素或系统,也可能是复杂系统或多个系统的组合等。第二,机械性思维常常把系统的元素、单元、部件等理解为有物理实体存在的事物,而主体不仅包含物理实体,还有过程、活动、机制等,体现出体系的生命结构特性。第三,主体具有自主发展和独立管理的性质,它在一定条件下能够独立运作、自主运用、自我保障、自成系统,而不是趋向单一结构、单一形态、单一特征等。考虑到资源分布不均与总体限制,体系的多个主体不一定能同步发展,主体之间既有协作也有竞争,众多主体在共同使命愿景下的异步演进将是体系的重要特征。

在体系概念中,关系无处不在,是决定体系行为和运作效能的关键要素。关系不仅仅由主体决

定,也会受主体与环境等众多因素间的相互作用影响。关系有实体之间的联系,也有过程之间的联系;有显式存在,也有隐式存在;有紧密耦合的“强”关系,也有松散连接的“弱”关系。就体系关系而言,不仅需要关心主体之间表露的“强”关系和各种显式关系,也需要关注暗含的“弱”关系和各种隐式关系。后者同样代表着体系重构、演化与发展趋势的可能性,甚至在特定时刻会对体系的潜能起到不可忽视的、关键性的作用。

在体系概念中,环境是整体不可或缺的组成部分,是决定体系属性的重要因素,二者间不仅仅是关联互动,更是彼此纠缠的状态。此处的环境,泛指一切会对体系目标产生影响的因素,比如政治、经济、文化以及竞争或对抗的对手等。一般系统思想将系统与环境分离是为了简化问题,通过选择目标对象和明确条件来界定系统的作用范围,并在相对明确的边界内探索系统的性质。体系思想则将环境因素纳入整体考虑,虽然这会使复杂性大大增加,但体系并不回避复杂性,而是在复杂性中探索获得发展机遇的方向、路径与方法。从体系视角来看,使树木生长的最好方法是同时关注其周边的生存环境,让森林茂盛的最佳方式是同时关注其内外的生态环境。系统思想让人们不能只见树木不见森林。体系思想则更进一步,让人们看树木、看森林、看环境,将视角延伸到更广阔的范围。体系的联合体要适应环境,同时它也在塑造环境,将环境纳入整体是体系的突出特征,也是体系与系统概念的最大区别。

### 2.2 系统与体系的比较

图1体现了系统概念与体系概念的不同。在系统的整体概念里,系统与环境之间划分边界,并且把环境也视为系统。而在体系的整体概念里,联合体与环境之间边界模糊或者不划分边界,它们都是体系的一部分,并且环境是动态开放的。

由图1可看出,在某种程度上体系可认为是系统的一种特殊状态,将自身与环境当作一个整体构成“系统”。系统也可以认为是体系的一种简化形态,将环境作为外部因素划分出去,体系的联合体部分即构成了典型的系统,或是多个系统的组合等。

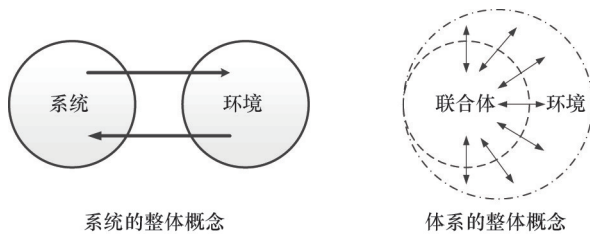


图1 系统与体系的区别

体系将主体集 $A^*$ 、关系集 $R^*$ 与环境集 $E^*$ 视为一个动态开放的大整体,并且着眼于提升联合体 $\langle A^*, R^* \rangle$ 对环境的适应和塑造能力。适应是联合体针对环境产生的结构变化,即根据实际情况进行自我变革。塑造是联合体对环境产生的作用影响,即按预期目标深刻改变环境。联合体内的诸多主体具有共同的使命、愿景、任务或者利益,联合体塑造环境的能力称为体系能力,建设体系的最终目标是按照使命愿景塑造环境。需指出的是,体系结构、体系运用、体系能力等术语对象通常指的是体系的联合体,效能、合作、竞争、对抗等术语对象通常指的是联合体对环境的塑造。

体系思想以终为始,从环境塑造效果出发进行整体考量,而非从构成要素和关系入手,并把许多不确定因素,如动态、模糊、涌现、多样性等纳入视野,从而将多种可能的构成方式和多种可能的环境影响作为整体进行思考,这也是进行体系设计时需要遵循的基本思想。体系思维将观察视野置于更高层次、更大范围,它不是解决单一领域或局部的问题,而是考虑如何从整体去塑造环境、塑造生态。当存在多个体系时,某个体系可将其他体系视为环境,竞争、对抗、合作共赢等都可视为体系塑造环境的方式。体系塑造既改变环境,也影响其他相关的主体及关系,二者都可以认为是被塑造的对象。例如,当观察2个体系之间的关系,其环境有重叠部分,也有独立部分,相互之间的作用影响如图2所示。

由图2可知,体系竞争与对抗的本质在于联合体适应并塑造环境,是将环境改变为联合体所期望达到的状态过程。某一体系的联合体塑造环境的能力越强,它在体系竞争与对抗中就更具有优势,

就越能影响和改变对方体系的联合体及其所处环境,并在竞争和对抗中胜出。

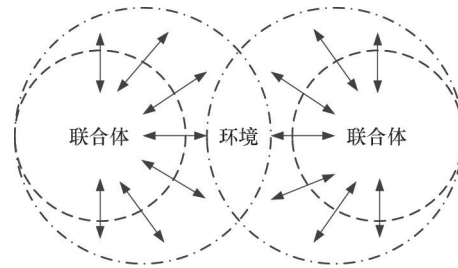


图2 2个体系之间的塑造关系

### 3 对体系工程的认识

一般而言,研制复杂工程系统所面临的基本问题是:怎样把比较笼统的初始研制要求逐步地变为成千上万个研究任务及参加者的具体工作,以及怎样把这些工作最终综合成一个技术上合理、经济上合算、研制周期短、能协调运转的实际系统,并使这个系统成为其所从属的更大系统的有效组成部分<sup>[13]</sup>。系统工程是人们为解决这些实际问题,在大量工程实践中逐步形成的各种组织管理的科学方法与技术的总称。

然而,随着现代科学技术尤其是信息技术的高速发展,人们在大量信息化实践过程中发现各方面事物的联系和交互变得日益频繁与紧密,系统、组织愈加形态多样复杂难测,它们与环境之间的边界越发模糊和难以划分。人们实践的对象从单一系统向服务于共同使命的多系统转变,从有明确的需求牵引向概念驱动、目标引导、效果度量、科学规划和导向性涌现转变,从生命周期、外部影响向持续创新演进、适应并塑造环境转变,从单纯的物理实体向物理实体与数字虚体孪生演进转变,这些都可视为体系现象。工程规模越大、覆盖面越多、各种利益诉求和发展要求越不一致,体系现象就越突出,系统工程面临的问题就越严重。新问题的产生孕育着新方法的发展,体系工程应运而生。

#### 3.1 体系工程基本概念

当前对体系工程的探索尚处于起步阶段,不同领域的研究人员对体系工程的理解和认识也多有

差异<sup>[9]</sup>。基于对体系现象的深入研究以及相应的工程实践,将体系工程定义为:体系工程是基于使命愿景重塑社会结构的跨领域、跨部门、跨学科工程方法与技术,是将设计、规划、建设、评估、运用等多个环节集于一体的实践过程(图3),目标是达成“导向性涌现”的体系塑造效果。经典物理、量子力学、复杂系统、信息主导等科学原理是体系工程的理论基础,主动性进取、适应性演进、整体性塑造、导向性涌现等是体系工程的动力源泉。

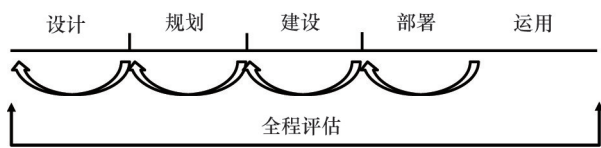


图3 体系工程实践过程

### 3.2 体系工程主要特性

体系工程主要有以下5方面特性。

1) 模糊性。体系工程的依据是国家战略等顶层战略。全局性、长远性、适应性和演进性等导向特征使得体系工程的“工程”边界模糊,没有明确的最终形态。与传统系统工程的确切性不同,涉及体系塑造效果的所有因素都可能成为其相关内容。

2) 整体性。体系工程通过顶层架构指导和约束具有共同使命愿景的联合体的多种发展目标与要求,不针对特定领域的职能,不针对特定部门的系统,不针对特定需求的项目,不针对特定方向的技术。与传统系统工程关注实体系统不同,体系工程更关注联合体对环境的塑造能力,更关注体系运作所能达成的效果,它是对社会结构的整体性变革。

3) 并行性。体系工程虽有阶段性目标,但不像系统工程那样限定明确的生命周期。构想、设计、规划、建设、部署、运用、评估等体系工程核心内容通常并行实施、滚动推进,将持续性演进嵌入到体系工程的所有环节,迭代推动能力提升。体系工程综合考虑需求紧迫性、资源可用性、技术可行性、效益回报性等多种因素,以最终塑造效果为目标,采取多种方式推进项目建设,不提倡通过巨型投资、耗费巨大管理代价进行刚性、统一的建设。

4) 治理性。体系工程采用“协作”的思想建立治理机制。治理的含义是对行使权力的方式进行反思和变革,核心是将权力中心机制转变为服务中心机制。体系工程中的治理,将对联合体刚性的统管与主体自治的主动有机结合互为补充,使得不同领域管理制度上重叠、冲突或疏漏的问题能够通过建立多种联合机制加以解决,以期形成服务型组织管理体制。

5) 继承性。体系工程是系统工程在思维、理论和方法论上的延伸、拓展与创新,而不是对传统系统工程的否定与抛弃。在具体的项目建设过程中,可按需继承系统工程有效的理论经验和科学技术方法,并在体系设计、建设等具体环节的牵引指导下,将体系能力目标的达成通过一系列具体的系统建设落实下去。

一般而言,体系工程主要采取自顶向下的研究方式,更关注整体、全局性的问题,不过多限制实现方案和技术手段,具有较强的灵活性和适应性。与系统工程相比,体系工程的进步主要体现在以下4个方面。

1) 体系工程将视野置于使命任务、共同利益,其整体性、全局性、导向性超出传统系统工程的范畴。体系工程聚焦于“应建成什么样”,而非“能建成什么样”。体系工程采取有效措施促进共识,用整体共识消解局部利益的干扰,将各方利益、多方诉求聚焦于体系能力与预期效果。

2) 弥补了系统工程适应动态变化的不足,并将不确定性视为可能的发展机遇。体系工程将分析体系可能面临的多种问题和挑战,赋予体系能力建设的主体足够的自治权,通过共同的使命愿景达成共识并激发变革潜能,让体系可以适应概念、结构、边界以及环境等诸多因素的变化。

3) 支持不同领域、部门在协作、竞争中共同发展。体系工程充分考虑社会结构、资源条件、技术发展、部门职能和运用环境等因素,将不同领域的诉求作为需求开发、体系设计、建设规划、体系运作等过程共同考虑的内容,促进使命任务有效转化为概念、能力和具体的运用。

4) 将长期演进作为体系能力升级的重要策

略,使体系运作机制、模式和方法在持续发展的前提下保持平滑,保持体系建设与运用的稳定性、延续性。体系的庞大规模决定了它不可能在短期内完成建设与更新,体系工程必须考虑遗留资产的作用与效果,在此基础上兼容集成并强调持续、不间断的体系能力提升。

### 3.3 经典体系工程方法

体系工程方法是以体系概念、思想为基础的实践指南和实施框架,能起到总体指导和规范作用。

体系的性质决定了体系工程方法涉及面更广、层次更高、多领域学科交叉性更强。体系工程方法的模型是对体系工程方法关键要素的抽象认识和高度凝练。

长期以来,系统工程方法模型研究受美国国防部系统工程V形模型影响较多,在此基础上形成的体系工程V形模型也一定程度上成为现有体系工程方法模型的典型代表<sup>[4]</sup>(图4)。

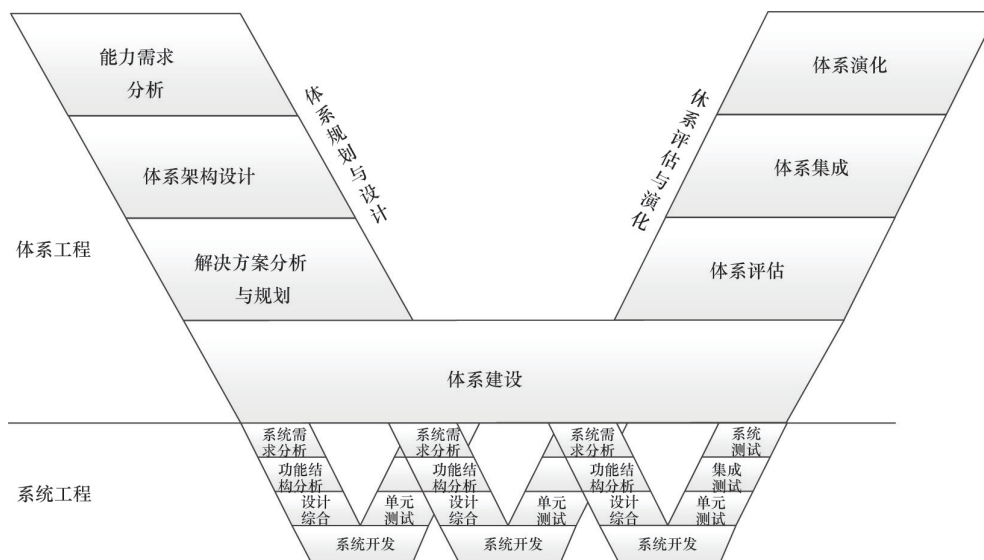


图4 体系工程V形模型

体系工程V形模型可以理解为多系统顶层设计和效果验证以及与多系统建设的叠加而构成的方法模型,对体系的研究开发有一定的理论指导作用。当前,体系工程方法模型正处于初期探索阶段,许多问题还有待更深入的研究。从现有的研究来看,一方面,体系工程与系统工程之间的关系不够清晰,有彼此脱节的现象;另一方面,将体系工程的落脚点置于“建”上,缺乏对设计、规划、建设、部署、运用、评估等体系工程各环节全过程的整体布局,也未能有效体现出体系工程的特性与进步所在。

体系工程不是系统工程简单的堆积叠加和局部改良,而是为解决体系现象而专门形成的工程方法与技术,与系统工程有明显区别。体系工程在概念上需要根据体系问题进行拓展,在方法上需要涵

盖体系设计、建设与运用等全部过程,在技术上需要融入与时俱进的创新内容。

## 4 体系工程“钻石”模型

### 4.1 “钻石”模型基本内涵

图5所示为体系工程“钻石”模型,它是以使命任务为起点,以塑造效果为目标,将架构设计、运用设计、探索实验、建设规划、体系评估、能力部署、体系运用、效果实验等8个过程有机融地合为一个整体进行综合治理的体系工程方法。因其构形类似钻石,故而命名为“钻石”模型。

在体系工程“钻石”模型中,使命任务是体系存在的必要条件,是体系工程的出发点与演进方向。

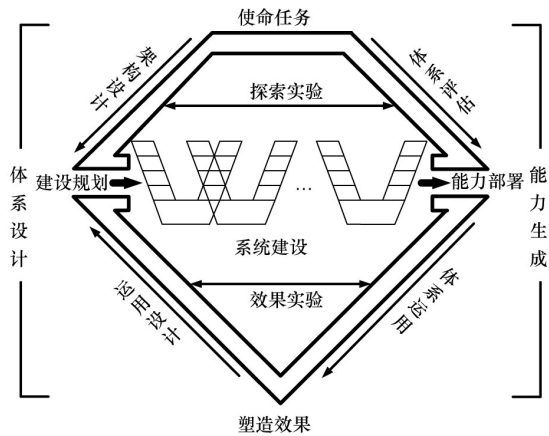


图5 体系工程“钻石”模型

塑造效果是体系发挥作用的最终目标,是体系能否达成或超过预期效果的衡量准则。使命任务与塑造效果处于“钻石”模型的两端,清晰地表达出工程方法追求的目标和效果。“始于使命、基于效果”是体系工程“钻石”模型方法的根本理念。

在体系工程“钻石”模型中,首先进行的是体系

设计。体系设计依据使命任务与实际需求,将架构设计、运用设计与探索实验作为一个整体,设计体系的目标、规则、要求、结构、发展途径与运用方式,并在设计过程中进行前瞻性实验探索,以树立和把握正确的体系建设导向,为体系建设提供目标和指南。而后,依据体系设计的总体目标与整体方案,科学规划建设步骤、细化建设内容、明确指标要求,并基于系统工程方法实施体系中的多系统建设,形成体系的物质基础,持续提升体系遂行使命任务的基础条件。在前述体系设计与系统建设的基础上,科学评估、科学部署并科学运用相关能力,适时进行体系效果实验,最终实现基于效果的体系能力生成,使体系处于“能力就绪”状态。

#### 4.2 “钻石”模型实施过程

体系工程“钻石”模型将宏观、抽象的体系工程较为明确地转化为多个环节自治、衔接、协作的可重复方法,是一种条理清晰、逻辑串联、全程评估、并行自治的实施过程(图6)。

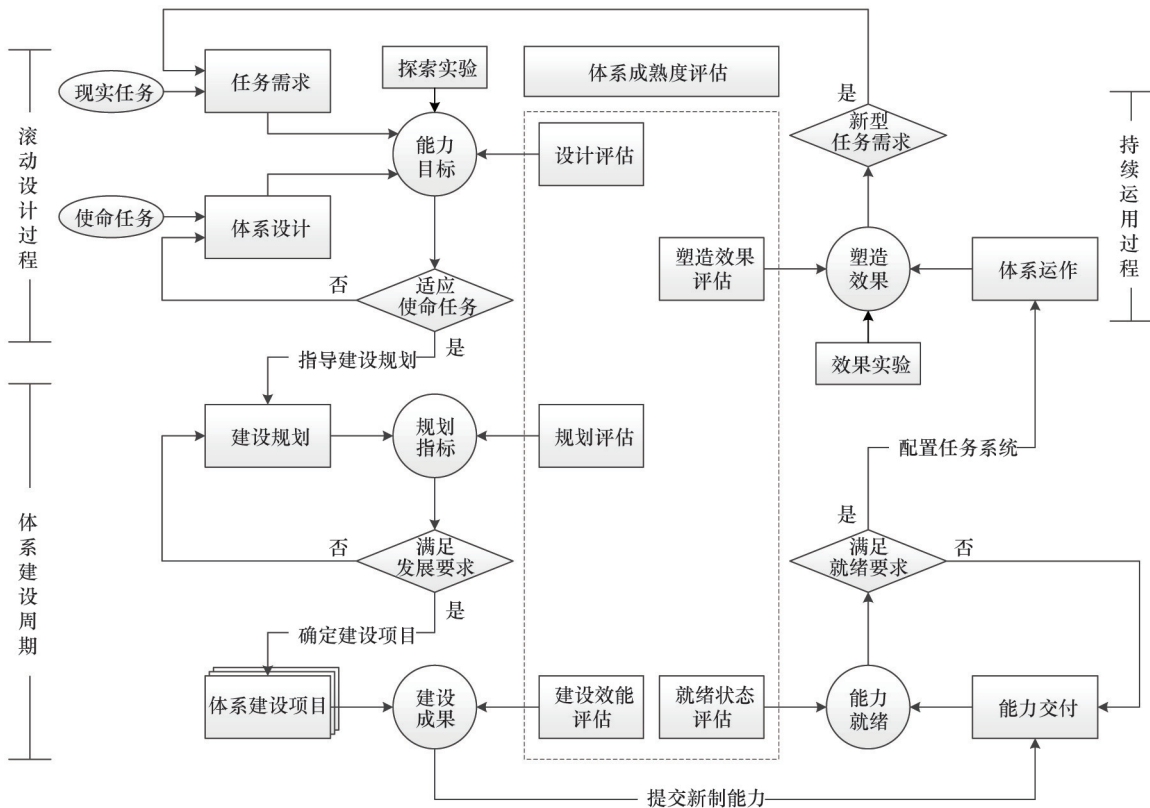


图6 体系工程“钻石”模型方法实施过程

逻辑串联是指体系工程各个环节、过程的相互衔接机制。体系设计、任务需求与探索实验共同形成了体系的能力发展目标和实现途径构想,为建设规划过程提供输入条件。建设规划过程依据体系的阶段性发展目标,综合考虑现实需要与资源条件,确定阶段性体系建设的项目和指标,明确体系建设的要求。体系建设过程按照规划的要求构建新质能力,为能力部署环节提供新型能力资源。能力部署环节按照运用需要部署任务系统,为体系运作提供基本条件。效果实验结合具体的运用场景,为实际塑造效果提供检验、反馈与支撑。体系运作的塑造效果产生新型任务需求或促成使命任务拓展,并反馈到体系设计和任务需求形成闭环,驱动体系持续演进。逻辑串联是以上各个过程在逻辑上的串行关系,但在实际运用中各过程往往会预先研究、预判分析、充分酝酿,协作互动。

全程评估是指体系评估全过程嵌入机制。设计评估是对体系设计目标的评价,用于衡量能力目标是否适应使命任务和任务需求,通过评估审核的能力目标将成为建设规划的指导要求,否则根据评估结果反馈继续完善体系设计。规划评估是对建设规划方案的评价,用于度量规划的阶段目标是否匹配和适应阶段发展要求,通过评估审核的建设目标和建设方案将会成为体系建设的具体项目计划,否则根据评估结果反馈继续完善建设规划。建设效能评估是对建设项目成效的评价,用于衡量能力增量是否达到建设规划规定的目标要求,以及分析原因并提出改善策略,通过评估审核的建设项目将交付增值的能力,否则根据评估结果反馈继续改进完善项目或确定项目是否继续建设。就绪状态评估对能力部署状态进行衡量,用于判断能力增量与已有能力的融合程度,检查能力缺项是否制定相应的补救措施,确定体系的整体能力是否处于运用就绪状态,通过评估审核的能力是体系运作的基础。塑造效果评估是对体系效果的评价,用于衡量体系实际运用的情况和产生的影响,评估的结果是体系演进的重要驱动因素。体系评估全过程嵌入机制实现了体系工程各环节评估的无缝衔接,其综合结果可对体系成熟度进行整体性的衡量,是体系治理

和管控体系“质量”的关键所在。此处,体系成熟度主要包括3方面内容<sup>[15-16]</sup>:一是互操作,表示数据、语义、操作的一致性程度,是信息交互、信息共享、信息服务的基础,是体系技术成熟度的表现;二是互理解,表示概念、知识、判断的一致性程度,是跨域协作、共同认知、联合规划、同步行动的基础,是体系认知成熟度的表现;三是互遵循,表示规则、制度、机制的一致性程度,是体系高效运作、敏捷适应、跨域融合、共同遂行使命任务的基础,是体系机制成熟度的表现。

并行自治是指各环节、过程具有一定程度独立性、自主性的管理机制。“钻石”模型方法的所有环节、过程在共同的使命任务与共识基础上并行展开、自主管理、持续滚动。并行是指各环节、过程可以同时展开,在持续研究、思考、互动和适应变化中,对过程产生的结果进行完善,使过程间的衔接能够快速满足评估要求。自治是指各环节、过程可以通过自身的观察、分析、决策和实践总结提出改进措施,驱动自身优化。一般而言,体系规模巨大、领域众多、专业突出且建设、运用环境复杂,不存在可以预知体系需求以及有效运用方式的上帝视角,僵化的统一管理或刚性的实施策略难以应对体系的复杂动态环境与适应不确定性要求。并行自治机制是针对体系这些特点所采取的柔性策略,强调动态、适应、持续和演进,能够在没有刚性统一的顶层“号令”与“计划”的情况下各环节、过程自主发展创新、持续完善、增量提升,在共同的使命任务驱动下并行演化并逐步衔接、融合。

#### 4.3 “钻石”模型体系设计

系统理论认为,事物的存在形式可视为结构。例如,建筑是一种支撑型结构,生产是一种过程型结构,社会是一种网络型结构。在管理科学和系统工程领域,用于表示事物和组织的人为构造的结构通常被称为“体系结构(architecture)”。体系结构描述了一个系统包含的组成单元、单元之间的关系以及制约组件设计和随时间演进的原则与指南。其中,组成单元可以是设备、系统节点、组织机构等,单元之间的关系可以是行为关系、交互关系等,原则与指南可以是约束、指导和规范等。体系结构

设计的方法称为体系结构框架,通常包括设计指南、设计模型、设计规则等。体系结构设计方法产生于西方发达国家,目前较为流行的体系结构设计方法,其基本理论和方法论都源自西方传统的科学观念,即世界是可测量的、可分解的、可控制的、可预测的等。这导致人们在不知不觉间模仿机器来设计流程和创建管理技术,并用机械化思维、确定性因素与刚性约束规范来设计组织架构和流程。因此,可以认为这些体系结构设计方法主要解决的多是系统问题,而非真正的“体系”问题。

体系结构框架最著名和影响最大的是“扎克曼框架(Zachman framework)<sup>[17]</sup>”。它将组织结构聚焦于“5W1H”,将是什么(what)、如何做(how)、在哪做(when)、谁来做(who),何时做(when)以及为什么(why)作为一个整体进行考量,同时提出用6种不同的视角来观察系统,即规划者、拥有者、设计者、实现者、建设者和使用者(图7)。扎克曼框架给出了体系结构设计的经典方法,当前流行的体系结构框架,如美国国防部发布的体系结构框架(DoDAF)、英国国防部发布的体系结构框架(MODAF)、国际开放组织发布的体系结构框架(TOGAF)等,其关键思想、流程和方法都可认为源自扎克曼框架。扎克曼框架遵循经典管理科学思想,属于典型的分析-综合-评估三段式过程管理,横向是分析的视角,纵向是分析的内容,将所有因

素与过程综合在一起形成最终的设计方法论。

针对领域、局部、规则明确的系统问题,经典框架设计方法起到了特别显著的作用,许多组织计划、生产计划、企业发展规划和各类社会活动规划等,都采用了“5W1H”经典框架。经典框架与系统工程常常假定并致力于构建严谨、刚性、结构清晰、高效优化的系统,有确定的专业分工、明确的利益关系、标准的操作流程等。然而,这与体系的理念相悖,在一定程度上甚至可以说是背道而驰。体系的理念是追求跨域融合、跨界协作、敏捷适应、结构重组等,刚性化的体系架构难以适应与满足体系的设计、建设与发展演化要求,体系也难以在权利优先、刚性约束下塑造效果、达成使命。兰德公司相关研究报告指出,美国国防部颁布的体系结构框架(DoDAF),与其说是在设计作战流程,不如说是在设计权利。虽然人们对相关组织结构进行了深入研究和改良,但都没有绕开权利流这一根本的利益核心。

针对这一重要问题,体系工程“钻石”模型在经典框架基础上对体系设计方法进行了改进和创新。“钻石”模型体系设计的基本思想是:行为或社会活动可以看作是信息活动过程,行为效果是信息活动处理结果的物理呈现。这一变化将体系设计的关注点从组成要素之间的权利流转移到动态柔性的信息流,聚焦于体系的信息活动并突出其主动性、

内容 视角	是什么	如何做	在哪做	谁来做	何时做	为什么
范围 (规划者视角)	交流实体	过程	地理位置	责任实体	时间属性	目标
模型 (拥有者视角)	实体关系模型	过程模型	位置模型	职责关系模型	事件模型	目标关系模型
系统 (设计者视角)	实体关系描述	过程描述	位置描述	职责关系描述	事件描述	规则描述
技术 (实现者视角)	数据规范	功能规范	位置规范	角色规范	事件规范	规则规范
规范 (建设者视角)	数据细则	功能细则	地点细则	角色细则	事件细则	规范细则
用户 (使用者视角)	数据	功能	网络	人员	时间	动机

图7 扎克曼框架

并行性、持续性,降低、消除因“谁来做(who)、在哪做(when)”导致的权力与利益影响和羁绊(图8),将着眼点放在应该“做什么”并立足于整体决定局部,防止体系设计因权利干扰而忽视全局视野与使命任务。根据其特点,将这一体系设计方法命名为基于信息活动的体系结构框架。

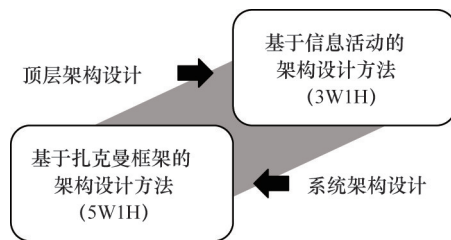


图8 2种设计方法的异同

经典框架是面向系统的设计方法论,设计的是局部或特定系统的结构。基于信息活动的体系结构框架则是面向体系的设计方法论,是超越于系统之上的设计方法,其核心在于突破权力与利益的干扰。原则上,体系结构框架没有先进落后之分,只有是否适用的判断。每一种体系结构框架都面向特定领域的问题,不存在一种万能的方法。基于信息活动的体系结构框架与体系特性相适应,适用于适应性、演化性强且使命导向的顶层架构设计。基于扎克曼框架的架构设计方法则与系统特性相适应,适用于严谨、刚性、结构清晰的系统架构设计。提出基于信息活动的体系结构框架也并非要取代现有各类框架,而是要探索更加适用体系问题的架构设计方法,充分发挥顶层设计和架构治理的作用,并通过其与经典框架的有机接轨,实现体系顶层设计向具体系统设计的无缝过渡与衔接,使系统设计和建设有导向、有依据、有约束、有规范。

基于信息活动的体系结构框架如图9所示。其中,设计规划是对体系结构设计任务进行规划,用于明确和规范架构设计要求。业务架构是体系结构设计的出发点,用于描述业务能力、组织结构、业务流程等。信息架构是体系结构设计的核心,用于描述从业务架构中提取出的信息活动、能力效果、信息交互等。技术架构是体系结构设计的落地,用于描述支撑架构实现的信息基础设施、信息

服务、技术标准等。管理架构是依据体系结构设计和实施路线,开展具体系统的建设管理。评估架构是在规划设计阶段或建设完成以后,对系统或体系能力进行评估验证。体系设计资产管理是对诸多体系结构设计的过程与架构成果进行统一、规范的管理。

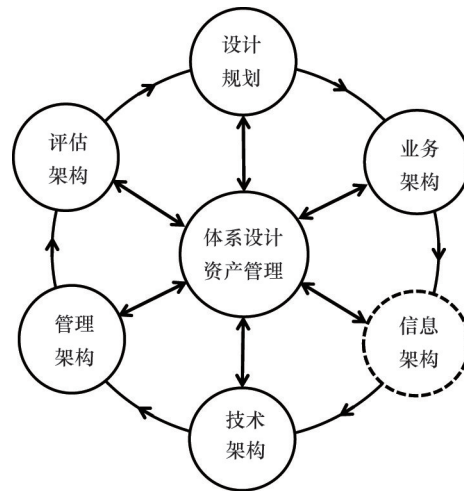


图9 基于信息活动的体系结构框架

#### 4.4 “钻石”模型治理机制

体系内拥有共同使命任务的联合体一般保持独立自主,鼓励自主发展与协同合作,强调基于信息活动的柔性特征适应并塑造环境,不断提升、发展体系能力。国内外多领域的实践经验证明,刚性、机械的工程治理范式难以有效应对体系问题,体系工程需建立新的治理机制,组织、指导、协调、规范、监督使命共同体进行能力建设和能力运用,推动体系持续演进,实现预期塑造效果。

体系工程需更加注重管理上的引导与协调,提倡柔性的“治理评估”(图10),而非刚性的“控制反馈”(图11)。治理的依据是指南规范,引导性要求较多。控制的依据是执行方案,要求严格具体。前者根据实际结果评估差距,给出调整改进要求。后者根据反馈结果判断误差,给出具体方案与控制指令,前者更适用于体系,后者更适用于系统。

体系工程“钻石”模型治理机制的基本思路是:目标和问题双轨引导,统管与分工有机结合,局部发展与整体联动并行推进,构建非对称优势能力与

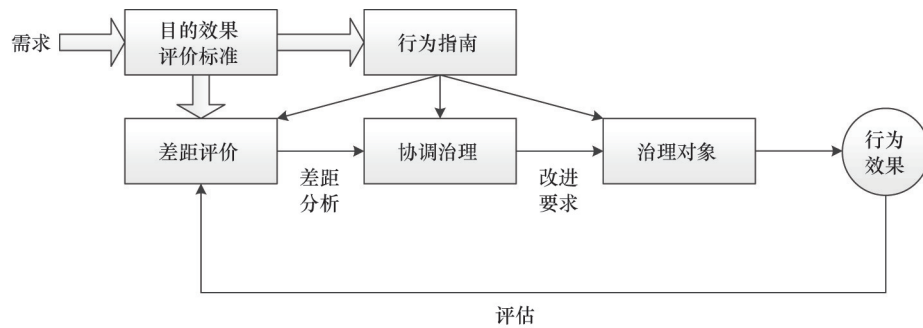


图10 治理评估环路模型

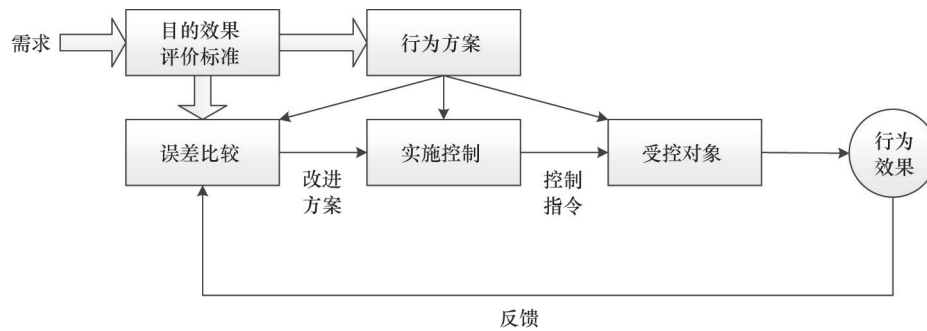


图11 控制反馈环路模型

弥补短板弱项共同开展,新技术运用与发挥已有资产效益互补支撑。主要包括以下4方面内容。

1) 设计与评估紧密结合。体系设计的本质是用目标“统”体系,即提出为实现使命任务,体系应该具备怎样的结构和能力。体系评估的本质是用效果“估”成效,即把握在设计、规划、建设、运用等体系工程的各个阶段环节相应的进度、能力、效果到了怎样的水平。为有效实现体系设计的目标,“钻石”模型强调建立覆盖全程的评估机制,评价各个阶段的效果是否达到了使命任务或阶段目标的要求,审查存在多大差距,分析存在差距的原因。“钻石”模型将设计与评估的双向作用视为“夹住”体系建设与发展的夹子,二者同步开展才能实现能力建设的导向和推动作用。设计提出了要求,为评估提供了标准;评估衡量了能力建设进展与效果,为改进设计、实施决策等提供了依据。“钻石”模型通过建立“设计、建设、评估”紧密关联的机制实施体系工程治理。设计体现了“统”,建设体现了“分”,评估推动了“统”与“分”的深度融合。

2) 愿景与任务紧密结合。愿景与任务是观察

和认识体系的两种视角,“钻石”模型将愿景与任务放在同等重要的位置独立展开,并在规划过程中进行二者的关联与双向对接,使不同视角的观察、不同人员的知识和不同背景的要求融为一体。愿景承载着理想状态和发展预期,偏重于中长远目标,产生于体系设计过程,侧重于提出体系应该具备的结构特征和能力,其优点是可以更长远、更有效、更完备地解决问题,缺点是难以快速见效。任务承载着现实和紧迫的需要,偏重于近期目标,产生于系统建设需求开发过程,侧重于提出亟需实现的功能或弥补能力短板,其优点是可以快速响应需求,缺点是长效性差,难以从根本上解决问题。“钻石”模型通过建立愿景与任务的紧密关联机制,从多元视角认识、汇集与开发体系需求,整体把握和权衡不同时间阶段的建设要求,通过互动、分析和资源统筹等方法,形成中长期愿景与短期任务有机结合的建设规划,用以更长效地指导系统建设和效果评估。

3) 能力提升与短板弥补紧密结合。体系能力建设是长期演进的过程,受资源限制、任务背景、要求调整等不确定性条件的影响,能力目标难以在短

期内全部实现,也无法彻底消除已有能力短板。这意味着体系工程需要建立能力提升与短板弥补有效衔接的治理机制。“钻石”模型将二者的衔接机制聚焦于能力部署环节。能力部署不仅是提交新质能力,还包括对体系进行再评估,对体系能力进行查漏补缺,指出存在的短板弱项,为体系设计、建设规划提供反馈,制定弥补短板弱项的措施建议并为体系运用提供指导。既确保新质能力能够快速融入体系发挥作用,又同时做好弥补短板弱项的预案,预防因短板的存在导致“漏水”现象。面对未来难以预期的任务背景和使命拓展,体系能力不足将是常态,体系工程须将这种不确定性纳入治理机制,为可能面临的复杂局势做好充分准备。

4) 过程自治与整体效果紧密结合。“钻石”模型的8个过程具有一定自治性,各个过程可以独立实施、异步推进、分工管理、协调发展、共同治理。过程自治,一方面是设置适当的自由度,鼓励各领域按照整体要求创新发展,而非按照刚性控制“牵一发而动全身”;另一方面是各个过程按照使命任务的目标和要求并行展开,而不是会导致互相等待和互相牵制的串行方式。体系设计者根据使命任务要求,滚动修订设计目标,既要保持相对稳定,又要及时纳入新的发展要素,确保体系设计的创新引领作用。建设规划者根据设计目标、现实差距及资源条件实施滚动规划,优选建设项目,使建设结果尽量满足设计目标和任务需求。体系运用环节的相对独立,使运用者能够充分发挥主观能动性,有效发挥体系能力。在整体效果上,“钻石”模型通过统筹协调,使各个过程在相同的使命任务要求基础上相互协作,并通过建立评价标准推动各方围绕使命任务共同履行职能,将过程自治产生的优势进行充分整合。

## 5 体系工程数智孪生

系统工程与信息技术的深度融合在很大程度上推动了体系工程的形成发展。随着新一代数字化、智能化技术的蓬勃创新,体系工程亦将与其紧密结合、共同发展。面向未来数字智能时代,体系工程研究需要与时俱进创新思想、概念和方法。

### 5.1 数智孪生提出背景

当前,以人工智能、数字孪生、先进计算、5G通信、物联网等为代表的新一代信息技术与现代脑科学、生命科学等领域技术迅猛发展、日新月异。新一轮数字化、网络化、智能化科技持续性的深度融合创新正催生出一个孪生于现实世界的、全新的数字智能虚拟世界。

数字孪生<sup>[7-11]</sup>技术较好地体现了上述趋势。数字孪生概念的提出可以追溯到2002年美国密歇根大学的一场学术讲座,现在一般理解为一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、忠实映射、高保真度特性,能够实现物理世界与数字世界深度交互与融合的综合性和多领域、跨学科方法和技术,近年来在智能制造、航空航天、美国军方、智慧城市等领域和组织中得到高度重视。2013年,美国空军在其发布的《Global Horizons》战略规划文件中,将数字孪生视为“改变游戏规则”的颠覆性机遇。2017年,美国武器装备制造商洛克希德马丁公司将数字孪生列为未来国防和航天工业6大顶尖技术之首。美国《Aviation Week》刊文预测,2035年用户在验收航空装备的同时,将验收伴随其全生命周期的数字孪生镜像。2016—2019年,数字孪生连续4年被世界领先的信息技术研究及顾问咨询公司Gartner列入“十大战略性技术趋势”。

这样一个重要发展趋势的背后有其自身深刻的科学性。基于物质与能量的信息处理、先进计算、机器学习、人工智能等现代数字化、智能化科技都呈现出一种“物质层面独立性”的特征<sup>[18]</sup>,数据、信息、计算、学习与智能都能够独立于物质层面而存在,它们不依赖于也不会反映出物质层面的细节,数字世界正在变得与物理世界同等重要甚至更加重要。

因此,在这样的背景趋势下,可以认为以人工智能、数字孪生等为代表的新一代信息技术与体系理论和工程实践的融合创新,将使未来体系横跨物理世界与数字世界,二者孪生演化共同发展,体系将拥抱虚拟实在(实际上而不是事实上为真实的事件或事物)。基于对体系工程的深入研究,并受以数字孪生为代表的数字化、智能化前沿技术启发,

提出体系工程“数智孪生”概念,以前瞻探究未来数字智能时代的体系和体系工程。

## 5.2 数智孪生概念内涵

数智孪生主要包括数智基因、数智孪生体与数智空间3部分内容,其基本概念框架如图12所示。数智孪生对体系的基本因素进行数字建模并赋予其智能机制,形成体系的数智基因。基于相同的数智基因,构建存在于现实世界和虚拟世界的数智孪生体,即相应的物理实体与数字虚体<sup>[19]</sup>(数字虚体用于表示与物理实体相对应的、由数字比特构成的存在于虚拟空间中的虚拟实在),二者间存在泛在、紧密的信息交互。而后,使用数字化智能化技术打造与现实空间相对应的数智空间,通过其对孪生体进行超现实淬炼、智能化演进。物理实体在现实空间的活动与数字虚体在数智空间中活动将产生类似于生物进化的过程和效果,相应的要素、结构、规则等将通过一定的方式迭代优化且反馈于数智基因并促使其发生进化。数智孪生有望为产生颠覆式能力优势提供机遇,为全面增强体系能力提供加速力。

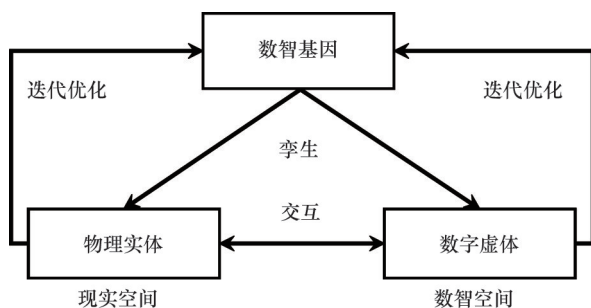


图12 数智孪生概念框架

数智基因是数字智能虚拟世界里的DNA,是运用前沿技术对体系的基本核心因素,如构成要素、体系结构、物理规则、信息规则、行为规则、组织流程等进行数字设计与建模并融入智能机制而得,蕴含人们对虚实世界的基本认识以及在此基础上对未来的设计。更具体地说,数智基因主要包含2种关键的编码信息。一种是实体构成规则,决定着体系中主体单元的物理结构;另一种是信息行为规则,决定着体系中主体单元的智能活动。数智基因

承载的是自然规则、流程结构、虚拟实在、智能行为与超前演进等,是体系工程数智孪生概念的基础与核心。

数智孪生体是基于相同的数智基因,孪生设计、构建存在于现实世界的物理实体和虚拟世界的数字虚体。它们是同基因的孪生体,一个存在于现实世界,即“实在”;一个存在于虚拟世界,即“虚拟实在”。其中,“实在”表示真实存在的事件或事物,“虚拟实在”是实际上而不是事实上为真实的事件或事物,即虽然不是真实的存在,但却被感受到真实存在,例如计算机程序等。这二者形成了彼此对应的数智孪生体,它们不仅在“形”和“态”上具有孪生关系,在“智”上也同样如此。这样的数智孪生体不局限于简单的个体,也包括群体及其间复杂的关联关系和紧密交互。

数智空间是综合运用人工智能、先进计算、数据科学、认知科学等前沿信息技术打造的数字智能虚拟环境,与现实世界人、事、物活动运转的复杂环境空间相对应,是对物理世界自然规律和真实场景的逼真再现。数智空间能够为数智基因与数智孪生体迭代优化、超前演进提供基础通用的标准和平台支撑。

## 5.3 体系工程发展展望

新一轮数字化、网络化、智能化科技大潮浩浩荡荡,人类社会的数字智能时代正在来临。物理世界在持续深度地数字化,数字空间正覆盖社会活动的方方面面,物理世界与数字世界之间的鸿沟随着现代科技的持续创新发展不断消弭,虚实联动的未来世界正在快速到来。

在未来,虚拟与现实二者,即数字世界与物理世界间不仅有紧密的联系,更是有相同的起源。人类是这二者的交点和起点,运用人类智慧设计出的数智基因也处于这样一个位置。数智基因蕴含人类对虚实世界各种事物的深刻认知以及对体系组成、结构、规则等各方面的智能设计与建模仿真,这是其承载和演进的核心内容,是面向未来建设数字化、智能化体系与进行体系工程实践的重要基础。

基于相同数智基因产生的数智孪生体,在物理与数字世界中虚实联动、孪生演化,数字世界中面

向多样、不确定的未来快速迭代试错推演优化,可以有效地反馈指导、促进物理世界的进步。数智基因是2个世界紧密联系的核心枢纽,蕴含着影响整个体系运行和能力涌现的关键因素,体系里主体、关系和环境因素的演化都能够回归并反馈于数智基因。

数智孪生将体系解构成了不断学习演进、深层次联系、物理实体与数字虚体紧密联动的虚实融合大整体,它强调物理世界与数字世界基于数智基因的前瞻设计、孪生演化,强调深刻、紧密、泛在的虚实联动,强调全面、精细且逼真的数字模型,强调从物理信号到社会行为的全程数字化再现,强调采用孪生演化的视角来看待基于信息链接的世界构成与未来虚实世界交融演进背后的本质,强调能通过数智空间真实地呈现复杂现象、发现潜在问题、激发创新思维、持续优化演进。

面向未来数字智能时代,体系工程实践不仅需要体系理论、工程管理方法论的创新,也需要在设计方法、实验方法、构建方法、评估方法、运用模式等方面的创新,更需要紧密结合前沿数字化、智能化技术发展进行创新。体系工程起源于系统工程与复杂性的碰撞,孕育于社会的信息化变革实践,机缘在智能化时代的虚实二重世界。

#### 参考文献(References)

- [1] Boulding K E. General systems theory—The skeleton of science[J]. *Management Science*, 1956, 2(3): 197–208.
- [2] Nielsen C B, Larsen P G, Fitzgerald J, et al. Systems of systems engineering: Basic concepts, model-based techniques, and research directions[J]. *ACM Computing Surveys*, 2015, 48(2): 1–41.
- [3] 顾基发. 系统工程新发展——体系[J]. *科技导报*, 2018, 36(20): 10–19.
- [4] Keating C, Rogers R, Unal R, et al. System of systems engineering[J]. *IEEE Engineering Management Review*, 2003, 15(3): 36–45.
- [5] Jonh H. Emergence: From chaos to order[J]. *Quarterly Review of Biology*, 2001, 31(1): 113–122.
- [6] Poza A S, Kovacic S, Keating C, et al. System of systems engineering: An emerging multidiscipline[J]. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2008, 1(1–2): 1–17.
- [7] Grieves M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication, White Paper[EB/OL]. [2019–12–31]. [http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc\\_mgr/912/1411.0\\_Digital\\_Twin\\_White\\_Paper\\_Dr\\_Grieves.pdf](http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf).
- [8] Grieves M, Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems, transdisciplinary perspectives on complex systems[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [9] Kraft E M. The US air force digital thread/digital twin—life cycle integration and the use of computational and experimental knowledge[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Science Meeting. New York: AIAA, 2015, doi: 10.2514/6.2016–0897.
- [10] Glaessgen E, Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles[C]//Proceedings of the 53rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. New York: AIAA, 2012.
- [11] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1–18.
- [12] 许国志, 顾基发, 车宏安. 系统科学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [13] 钱学森. 论系统工程[M]. 湖南: 湖南科学技术出版社, 1988.
- [14] 胡晓峰, 张斌. 体系复杂性与体系工程[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2011, 6(5): 446–450.
- [15] 曹江, 高岚岚. 互操作、互理解、互遵循——军事信息系统的新型能力目标与评估模型[J]. *指挥与控制学报*, 2015, 1(1): 41–45.
- [16] 刘俊先, 曹江, 张维明, 等. 网络信息体系的成熟度评估[J]. *指挥与控制学报*, 2016, 2(4): 282–287.
- [17] Sowa J F, Zachman J A. Extending and formalizing the framework for information systems architecture[J]. *IBM Systems Journal*, 1992, 31(3): 590–616.
- [18] 迈克斯·泰格马克. 生命3.0[M]. 浙江: 浙江教育出版社, 2018.
- [19] 胡虎, 赵敏, 宁振波, 等. 三体智能革命[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

## Diamond model and digital-intelligent twin for system of systems engineering

CAO Jiang, CHEN Bin, GAO Lanlan, PING Yang, FAN Zhiqiang

Institute of War, Academy of Military Science, Beijing 100091, China

**Abstract** Backgrounds, concepts and definitions of system of systems (SoS) and system of systems engineering (SoSE) are studied from the perspective of complexity in this paper. Connotations of agent, relationship and environment in SoS are analyzed in detail, and the differences between the concepts of system and SoS are compared. A new approach called diamond model to implement the idea and theory of SoSE is proposed and discussed comprehensively along with a new information process based architecture framework, which is more suitable for SoS than the classical Zachman framework based architecture. A novel concept called digital-intelligent twin is presented to proactively explore and foresee the comprehensive essence of SoS in the coming digital and artificial intelligence era. Corresponding meaning and concept framework of digital-intelligent twin and the development trend of future SoS are illustrated briefly.

**Keywords** system of systems (SoS); system of systems engineering (SoSE); diamond model; digital-intelligent twin ●



(责任编辑 刘志远)