

系统工程新发展——体系

顾基发

中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190

摘要 介绍了体系和体系工程的含义与特点、体系工程过程、有效的体系结构框架、体系工程的研究热点。从系统科学和系统工程发展历程的角度, 阐述了体系和体系工程出现的背景及主要内容, 列举了研究工作中存在的不同观点并介绍了当前的研究热点。

关键词 体系; 体系工程; 系统工程; 系统科学

“系统工程”最早在 20 世纪 40 年代由美国贝尔电话公司提出, 50 年代在美国制造原子弹的“曼哈顿”计划及以后美国北极星导弹和阿波罗登月计划皆为系统工程取得成果的著名范例。中国自 20 世纪 70 年代末到 80 年代在工程学的实际应用方面有了很快的发展, 最初 1979 年钱学森提出 14 门系统工程, 后来随着应用的发展很快有了其他各门系统工程。20 世纪 90 年代到 21 世纪初出现几门新的系统工程: 计算机集成制造系统、网络系统工程、服务系统工程(供应链)、金融系统工程、大型工程(三峡、青藏铁路)、大型社会项目(亚运会、奥运会和世博会)、生物系统工程、医学系统工程、智能交通系统、社会预警系统、电子商务、电子政务、可持续发展等。

从 20 世纪 60 年代贝塔朗菲提出一般系统理论以来, 20 世纪 70 年代起系统科学中出现不少新的学科分支, 如耗散结构、协同学、超循环、突变理论、混沌学、分形等, 从 1986 年起钱学森亲自参加系统学讨论班, 对各个分支逐一介绍并作出点评。钱学森希望由此形成中国的系统学并给出英文名词(systematology)。这无疑是中国系统科学界一个重要发展动向。20 世纪 90 年代出现了复杂系统, 其中一个钱学森提出的从简单系

统到复杂系统、再到开放复杂巨系统(如社会、生物、经济、军事、环境等复杂系统), 进而提出了从定性到定量综合集成的方法论及综合集成研讨厅; 另一个是圣菲研究所 20 世纪 90 年代中提出的复杂自适应系统以及多主体仿真系统的建模、复杂网络分析和遗传算法等方法。复杂自适应系统从以下多个方面表述系统特征: 1) 从结构方面, 它是由非常多的元素、简单子系统、很多组件组成, 它们具有不同的标度, 相互之间是动态的交互作用的; 2) 它们具有层次性、自组织性和涌现的现象; 3) 在时间标度上它是演化的, 有可能出现混沌; 4) 跨学科。

在 20 世纪末, 中国系统工程学会许国志组织专家编写了一本《系统科学》(2000 年出版)。该书系统阐述了对各类系统的结构、功能和演化、有普适意义的动力学系统理论(包括分岔、混沌等)、自组织理论、随机性理论, 以及简单巨系统、复杂适应系统、开放的复杂巨系统的理论, 对信息论、控制论、运筹学、系统工程方法论等系统工程技术也作了简要介绍。近十多年来, 除了一般性的系统科学有了发展, 一些专门的系统科学也在迅速发展。例如随着全球变化研究的发展出现了地球系统科学, 目的是促进地球系统集成研究和变化

收稿日期: 2018-03-24; 修回日期: 2018-05-01

作者简介: 顾基发, 研究员, 研究方向为系统工程, 电子信箱: jfgu@amss.ac.cn

引用格式: 顾基发. 系统工程新发展——体系[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 10-19. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.20.002

研究,以及利用这些变化进行全球可持续发展能力研究。在生物界,从系统角度研究生物的系统生物学开始蓬勃发展起来。在物理学界同样有这样一种将物质分解成分子、原子以至夸克以后,反过来对物质世界走向系统和整体研究以及复杂性的研究的趋势,杨振宁、周光召等认为对称性造成各种事物的统一性,而对称破缺造成事物的复杂性和多样化,他们主张整体性的研究,杨振宁等在数学工具方面应用了拓扑学中纤维丛及规范建模(Gauge modeling)等,还有一些从物理和其他系统交叉起来研究的新方向,如金融物理,有人利用规范建模描述简单金融市场。再如社会物理,利用物理现象描述行人动力学,描述社会舆论的动力学,还有利用社会网络分析各种社会关系等,也值得注意。

国内外从20世纪50—70年代,用得最多的系统方法论一直是着重定量模型和讲究优化的系统方法论为主,最著名的为霍尔的系统方法论,还有运筹学、系统动力学和系统分析等,后来被切克兰特称之为硬系统方法论。到80年代,由于处理社会系统以及涉及人因素较多的系统,再加有不确定因素较多的战略问题等而出现一批软的系统方法论。这些软的方法论比较着重定性、概念模型,不再过分追求最优解而是只要能找到可行满意解,甚至使系统有好的改变就可以,而且强调是不断学习的过程。其实中国中央高层领导提出的“摸着石头过河”就是一个改革社会的很好的方法论,它强调学习、试错和试点。钱学森等针对开放复杂巨系统(如社会、生物、经济、军事、环境等复杂系统)提出了从定性到定量综合集成的方法论及为了实现这个方法论的技术和工具——综合集成研讨厅。顾基发和朱志昌提出了物理-事理-人理系统方法论。再加上另一些日本和中国学者提出的方法论由于具有东方哲学和文化特色,我们称之为东方系统方法论。

为什么提出体系?以信息技术为代表的高新技术的快速发展,使得系统间的联系和交互变得愈发频繁和紧密。20世纪90年代末系统工程规模变得更大更复杂,以复杂自适应系统为理论指导的体系(system of systems, SoS)出现,体系及体系工程逐渐成为系统工程、管理科学等诸多领域新的研究领域。下面举几个体系的例子:军事体系、武器体系、企业体系、计算机体系、全球地面观测体系(global earth observation system of systems, GEOSS)、交通体系、社会体系等。例如,全球地面观测体系 GEOSS 是最近几年提出来的,它是由

设置在全球各地的传感器、通信装备、存储系统和各种计算机设备组合而成,用于观测地球、了解地球的动态过程以便对一些现象加以预报,监测各国执行环境公约的实际情况。中国最先关注体系的是军事科研部门,发现现代战争早已不是单个军兵种在作战,而是体系对体系的战争;有的国家被打输了,并不是因为有生力量被大量歼灭,而是整个指挥体系垮了。此外,以下情况促使更多人关注体系的研究:1) 新技术引起新产业革命;2) 老知识框架只适于稳定的变化较慢的社会;3) 老的系统工程和管理方法已不适合于以知识为基础的快速的过渡时期;4) 要用复杂系统科学;5) SoS的能力要确保演化、突现和适应^[1]。

1 体系和体系工程的含义与特点

“体系”对应的英文词汇(system of systems),最早出现在1964年Berry B. J. L.的一篇论文中,讨论城市系统中的系统^[2]。随后,很快用于社会学、生物学和物理学领域。美国系统科学体系工程协会(SoSECE)主席Reckmeyer W. J.认为,体系源于系统科学,是系统科学关于软系统和硬系统研究的综合,对大规模、超复杂系统的研究。体系概念的演化发展经历了系统科学发展过程的分支与融合过程,如图1^[3]所示。

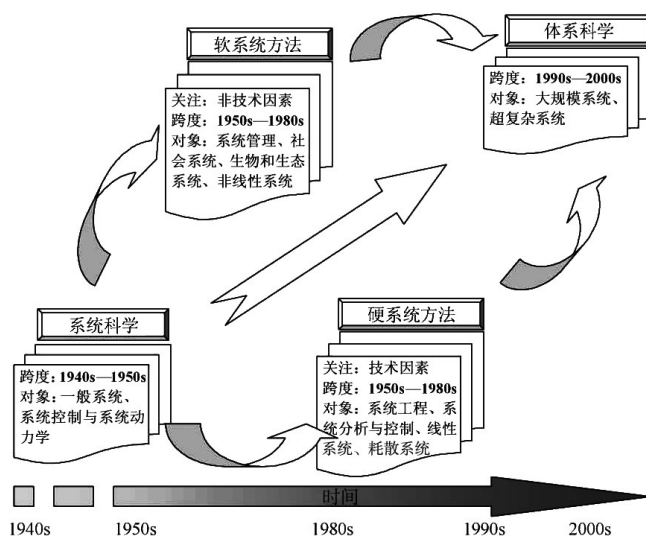


图1 体系概念的演化

1.1 体系的各种定义

体系是目前大多数大规模集成体(包括系统、组织、自然环境、生态体系等)普遍存在的问题,对这一问

题的研究从最初 Eisner 在研究多系统集成时提出 SoS 的概念、特征到目前这一术语成为众多领域热点问题,其典型的概念与定义不下 40 种。

体系是由多个系统或复杂系统组合而成的大系统。在不同领域和应用背景中体系的定义也不完全相同。在众多关于体系的描述与定义中,有如下 17 种较为典型的定义描述了不同领域的问题背景与对体系的不同理解与认识^[3-8]。

定义 1:体系是系统的联接,在系统联接的体系中允许系统间进行相互协同与协作,如信息化战场的 C4I (command, control, computers, communications and information) 与 ISR (intelligence, surveillance and reconnaissance) 系统。这一定义的应用背景是现代军事系统的集成以获取战场对抗的信息优势与决策优势。

定义 2:体系是大规模分布、并发系统的集成体,组成体系的系统本身就是复杂单元。这一定义的应用背景是企业信息系统。

定义 3:体系是系统的综合,系统综合以系统的演化发展、协同与优化为目的,最终达到提高整体效能的宗旨。体系不是单纯系统的集成,它具备以下 5 种特征:1) 组成系统独立运作;2) 组成系统独立维护管理;3) 组成系统的区域分布性;4) 具备“涌现”行为;5) 体系是不断演化发展的。这一定义的应用背景是未来战场环境信息系统的综合集成,军事领域复杂体系的发展规划。

定义 4:体系是分布环境中异构系统组成网络的集成,体系中这些异构系统表现出独立运作、独立管理和区域分布特征,在系统和系统间交互被单独考虑的情况下,体系的“涌现”与演化行为不太明显。这一定义的应用背景是国家交通系统、军事体系和空间探索。

定义 5:体系的组成不同于一般系统的内部结构(紧耦合),它是一种系统间的交互,而不是重叠。它具备如下特性:1) 能够提供单一系统简单集成所不具备的更多或更强的功能能力;2) 其组成系统是能够独立运作的单元,能够在体系所生存的环境发挥其自身的职能。这一定义的军事背景包括地面防空体系、战区导弹防御体系、作战群的编成体系等,其非军事背景如航天飞机。

定义 6:体系是复杂的、有目的的整体,这一整体具备如下特征:1) 其组成成员是复杂的、独立的,并且具备较高的协同能力,这种协同使得体系组成不同的配

置,进而形成不同的体系;2) 其复杂特征在很大程度上影响其行为,使得体系问题难于理解和解决;3) 边界模糊或者不确定;4) 具备涌现行为。

定义 7:体系是一种“元系统”,其自身由多个自主的、嵌入的系统构成,这些自主的、嵌入的系统在技术、环境、地理区域、运作方式以及概念框架等方面是不同的。

定义 8:体系是相互协作的系统的集成,这些组成系统具备两种附加特性,即运作的自主性与管理的自主性。

定义 9: Kilicay N. H. 关于体系的概念框架是从网络中心战的需求出发给出了对体系的理解与定义。

定义 10:国防大学陆军工业学院 Kaplan J. 认为,体系是巨大的、复杂的、持久的独立系统的集成,这些是随着时间的发展通过各自的权威提供各自的能力以支持总的使命从而形成体系。

定义 11:美国国防部认为,“互相依赖的系统组合链接,提供的能力远大于这些系统的能力之和”。与体系的定义相对应,美国国防部同时定义了系统联邦,所谓系统联邦是指具备下列特性的一组系统:1) 能力为所有组成成员的能力之和;2) 具有所有成员共有的特征;3) 系统的组合并不产生新的能力和属性。

定义 12:体系是由复杂、独立系统组成的“超系统”,这些独立的系统通过交互实现其共同的目标。体系特征包括:1) 体系是巨型复杂系统;2) 它由相互独立的系统组成;3) 具有动态的开放环境。其实例包括天气、海洋以及应付天气海况变化的应急体系等。

定义 13:2005 年,美国参谋长联席会议主席在《Joint Capabilities Integration and Development System, JCIDS》(《联合能力集成与系统演化》)中给出了体系的定义:“体系是相互依赖的系统的集成,这些系统的关联与链接以提供一个既定的能力需求。去掉组成体系的任何一个系统将会在很大程度上影响体系整体的效能或能力。体系的演化需要在单一系统性能范围内权衡集成系统整体。战斗飞行器是体系研究典型案例,战斗飞行器既可以作为单一系统研究,也可以作为体系的子系统研究,作为体系研究时,其组成系统包括机身、引擎、雷达、电子设备等”。

定义 14:美国陆军部在关于陆军软件模块化法规(版本 11.4E, 2001.09)中对体系的定义:“体系是系统的集合,这些系统在协同交互过程中实现信息的交换与

共享”。

定义 15: Maier 在 1996 年提出体系是为实现共同目标聚合在一起的大型系统集成或网络; 常见的 SoS 包括国际航空系统(飞机、机场、航空公司、航空交通控制系统)、海军水面舰艇火力支援 SoS(侦察、定位、武器系统和 C4I)、战区弹道导弹防御 SoS(监视、跟踪、拦截系统和 C4I)等。

定义 16: Cook 在 2001 年提出体系是包含人类活动的社会—技术复杂系统, 通过组成系统之间的通信和控制实现整体涌现行为。

定义 17: 美国国防部定义体系是相互关联起来实现指定能力的独立系统集成或阵列, 其中任一组成部分缺失都会使得整体能力严重退化, 能够以不同方式进行关联实现多种能力的独立系统集成或阵列。

除以上关于体系的定义外, 还有大量的文献对体系这一概念进行了研讨。

粗略归纳一下, 体系区别于一般系统的主要特点如下。

- 1) 规模大, 结构复杂, 由组分系统协作集成。
- 2) 组分系统在地理上分布广泛, 可独立运行、独立管理, 具有独立的功能。
- 3) 目的性强, 但目标不固定, 可动态配置资源以适应不同任务的需要。
- 4) 组分系统完成共同目标时相互依赖, 可同时执行和互操作。
- 5) 开发过程实行集中管理和规划, 不断演化发展, 涌现新的行为和功能。
- 6) 重视协调和开发来自不同组织或不同利益相关者完成共同目标的能力。

现在低碳经济、能源、交通、环境保护、社会保障、信息网络、武器装备体系等问题都涉及多个复杂系统, 这就是前面所说的“体系”问题。

1.2 看待体系的不同观点

从目前国内外关于 SoS 的研究看, 对 SoS 问题认识有如下观点。

1) SoS 是动态的、不确定环境中大规模系统的集合, 其动态不确定性导致 SoS 的需求预测困难, 是对传统系统工程的挑战。

SoS 概念最初的提出是 Eisner, 他认为 SoS 应该具备以下 6 个特征。

- (1) 由独立的系统构成, 每个系统的运作都遵循系

统工程的过程。

(2) SoS 中每个系统的发展在时间阶段上不存在关联。

(3) SoS 中系统之间的关联不是决定与被决定的关系, 而是相互依赖的关系。

(4) 从整体来看, SoS 中单个系统通常都具备自己的职能, 并在 SoS 运作中发挥作用。

(5) SoS 中每个系统的最优化并不能保证体系的最优化。

(6) SoS 中所有系统的运作促使体系目标或使命的实现。

后来, Buede 把这些概念关联到传统的系统工程技术。Buede 认为传统系统工程方法如果不能明确建立问题的柔性或刚性需求的话, 就不能有效解决问题, 这一问题在高层决策中经常遇到。现实世界中, 由于环境的变化与不确定性主导了世界, 导致需求难于预测, Buede 认为 SoS 的研究是对传统系统工程技术或方法的挑战。

Norman 认为高层需求建立困难的原因是 SoS 的动态性和复杂性。SoS 是动态环境中交互系统的集合, SoS 中的系统都具备两种特征: 1) 有 SoS 的背景环境; 2) 受 SoS 中其他系统的影响。SoS 同环境的边界是模糊的, SoS 边界的确定途径之一取决于 SoS 决策者的判断; 通常, SoS 的边界是非常之大, 足以囊括 SoS 决策者所关注的所有因素以及这些因素在 SoS 众多系统中的行为。在 SoS 中的每一个系统通常都由大量的行为实体组成, 这些实体的行为包括合作、中立和敌对行为, 这些行为又通常以团队、组或者非协作个体行动方式组织。系统中的实体可能运作在 1 个或多个 SoS 的系统之中, 且对 SoS 中其他不同的系统可能有不同的行为表现。

通常情况下, SoS 的决策者关注 SoS 的效率和效能, 但决策者对 SoS 中系统的行为可能不能进行直接的控制, 而且, 对 SoS 来说不存在如此之大的控制机制。这就导致了 SoS 中系统行为可能呈现出较大程度的自主行为。

基于对系统中的系统问题的这一认识, Rod 对系统工程、管理科学、公共管理及知识工程 4 个领域的方法和技术针对 SoS 问题的解决进行分析和比较。这些方法和技术包括了 4 个领域的 6 种方法, 并采用 11 个参数进行了评价。

2) SoS 仍然属于系统类,但是区别于大规模集成系统。

Owens W. 把 SoS 归为系统类,定义系统中的系统是由各个部分组建,其各部分在其自身的位置上即为大规模系统。与复杂大规模集成电路系统相比较, Maier 认为系统中的系统应该具备以下特征。

(1) 组成元素运作的独立性。如果 SoS 被分解为各个分系统,则分系统能够独立有效运作。SoS 就是由这些在自身的位置上能够独立运作的系统组成。

(2) 组成元素可获取的独立性。SoS 的组成部分在构建或形成 SoS 过程中可以被独立获取,在形成 SoS 后仍然保持持续运作的存在。

(3) SoS 模式的演化。SoS 并不以固定的模式出现,其存在和发展都伴随其功能、使命、环境、知识和经验的变化而演化。

(4) SoS 的“涌现”行为。SoS 在功能的执行以实现其目标过程中所表现出的行为是其组成各部分所不具备或不能表现出的行为,这些行为是整个 SoS 的“涌现”特性。SoS 的“涌现行为”是 SoS 的基本特征和构建体系的主要目标。

(5) SoS 的分布性。SoS 的各部分在地理上广泛分布,通过信息交流技术在各部分之间进行信息交流实现各部分之间的融合。

根据 Maier 对 SoS 特征的描述,常见的 SoS 包括国际航空系统(飞机、机场、航空公司、航空交通控制系统)、海军水面舰艇火力支援 SoS(侦察、定位、武器系统和 C4I)及战区弹道导弹防御 SoS(监视、跟踪、拦截系统和 C4I)等。

在 Maier 定义基础上 David 定义了联合 C4IS-REW 体(JCS),它是通过信息技术、文化、条令条例途径把各军兵种 C4ISR 和电子战系统(electronic warfare systems, EW)有效集成以获取超越各部分能力的效果。这一联合体为军事行动中的计划、部署以及行动提供及时有效的信息以支持决策优势的获取。根据 Maier 的定义, Laird 认为 JCS 就是一个 SoS 的实例,是 ISR、C4(command, control, computers, communications)和 EW 的快速、适时并有效地集成。

3) SoS 是信息时代军事变革的主要内容,是决定未来战争胜负的关键。

最近几年,复杂 SoS 工程受到了越来越多学者的关注,尤其是在联合作战研究领域,SoS 建设被认为是通

过众多作战平台、武器系统、传感器系统和通信交流系统等战场实体的协同运作实现战争目标的必要措施,这种系统间协调运作的需求大大增加了战场建设的复杂性,这一问题也成为战场指挥官关注的焦点。美军前大西洋战区司令官 Sheehan J. 认为,未来战争的胜负将取决于对战场作战 SoS 的控制能力,这种能力就是采用先进的信息技术链接战场硬杀伤和软杀伤的能力。

美军参联会前主席 Owens W. 把未来的网络中心战思想归为 SoS 思想,认为实现网络中心战的关键就是整合美军在 ISR 系统、C4 系统和 PGM 3 个领域的技术优势,构建一个 SoS 提供传感器到武器投射平台灵活的、无缝的链接。信息时代的军事变革本质上就是体系的形成,这种体系的主要部分是 ISR 系统、C4 系统、系统适时集成技术以及能够充分利用内在潜力的条令条例、战略战术和军事组织。

20 世纪 90 年代中期,美国应用物理实验室基于 SoS 本质上是一个联合军事实体的认识提出了支持联合作战的联合 SoS 概念,所谓联合 SoS 是指链接 C4 和 ISR 以及精确制导武器的联合军事实体。联合 SoS 是改变传统战争的新概念,是支持未来信息化战争、提供战场环境中信息优势的手段。在联合 SoS 的概念研究基础上,应用物理实验室提出新的作战思想——“精确闪击战”,这一思想在 21 世纪之初的伊拉克战争中成为指导美军作战行动的主要指导思想,得到了实践的检验。

1.3 体系的综合定义

从以上关于体系的定义与描述可以看出:体系应该是一种完整的框架,它需要决策者充分综合考虑相关的因素,不管这些因素随着时间的演变而呈现出何种状态。体系问题研究的迫切性不仅是因为今天系统复杂性增加的挑战,在信息时代的今天,人类的决策经常面临着大规模的数量、高密度交互与关联、长时间的跨度规划问题。在一般系统问题上,其明确的边界与独立的运作能够让人游刃有余地处理,但由这些系统组成的体系表现出“涌现”行为特性却让人对体系问题的处理显得较为棘手,对体系问题的处理需要认识、分析和理解体系“涌现”模式的演化特性。体系方法并不倡导某种工具、方法手段或实践,相反,它追求一种新的思维模式,这种思维模式能够迎接体系问题的挑战。体系研究是多学科的交叉,其相关领域的研究包括系统、系统工程、复杂性、协同性和混沌特征等。

将上面各种定义综合归纳一下,体系和其他系统

的区别在于体系的十大主要特性:1) 独立性。组成体系中各系统是独立可用。2) 异构性。组成个体的异构性。3) 自主性。各系统管理自主独立。4) 分布性。各系统分布不同地理位置。5) 演化性。关系复杂与演化发展。6) 非线性。涌现行为。7) 关联性。因素与各系统影响的关联性。8) 自组织。系统能自组织。9) 适应性。环境适应性。10) 模糊性。边界和目标模糊。

由于在不同体系,如作为系统工程升级的体系、计算机体系、国防用武器体系、企业体系等各有自己的定义,此外它们大多将复杂自适应系统作为自己的基础,Sheard曾经将它们放在一起形成体系的综合定义,如图2⁹⁾所示。

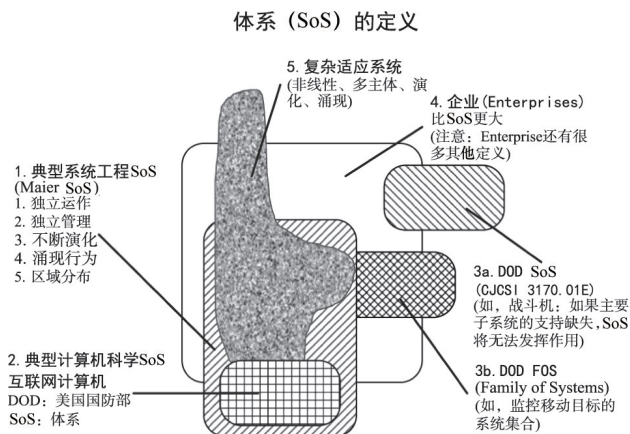


图2 体系的综合定义(S. Sheard)

1.4 体系工程

在种种体系问题背景下,体系工程(SoSE, system of systems engineering)应运而生。与传统的系统工程理论相比,体系工程在分析和解决不同类型的、独立的、大型的复杂系统之间的相互协调与相互操作问题更具有针对性。

体系工程是对系统工程的延伸和拓展,它更加关注于将能力需求转化为体系解决方案,最终转化为现实系统。一般地,系统工程在系统开发前,明确并建立一个严格的系统边界,针对这个边界规范一系列的子需求,并根据这些需求完成一个系统的设计和开发。体系工程则主要通过平衡和优化多个系统之间的相互关系,实现可互操作的灵活性和应变能力,并最终构造一个可以满足用户需求的体系。多个方面对系统工程和体系工程的比较见表1¹⁰⁾。

从体系开发过程角度来看,体系工程包含体系需求(获取与分析)、体系设计、体系集成、体系管理、体系优化和体系评估等过程。

表1 体系工程与系统工程的对比

	系统工程	体系工程
关注对象	单复杂系统	集成多个复杂系统
目标	最优化	满意
途径	过程	方法学
期望	解决方案	初始响应
解决问题	规定的	涌现的
分析方法	技术主导	背景影响主导
目的	单元的	多元的
边界	固定的	不固定的

体系工程发展过程经历了3个阶段。

第一阶段是20世纪90年代中期,体系的现象与问题的产生、技术迅猛发展使得复杂的技术集成与管理问题越来越突出,在各个领域都出现了大规模系统集成与更新换代的需求,如国防系统、城市交通、航空管制及航天技术集成等。

第二阶段始于20世纪末,广大学者开始探索解决体系问题的思路与方法,首先认识到传统系统工程在解决体系问题上的不足,然后开始新的途径与方法的探索。

第三阶段是21世纪初,体系工程概念被普遍接受,进行了系列的理论研究与工程实践活动,成立体系工程研究机构(如IEEE SoSE, International Council on System Engineering),举行体系工程的年度专题会议,并创办了《International Journal of System of Systems Engineering》杂志,这些工程实践活动包括美军未来作战系统(future combat systems)的全新设计与实现、美海岸警卫队深海作战系统的一体化改进及战区导弹防御体系的构建等¹¹⁾。

2005年,美国建立了2个体系研究中心,一个是体系工程研究中心(SoSECE, SoS Engineering Center of excellence),另一个是美国老道名大学(Old Dominate University)的国家体系研究中心(NCOSE, National Centers of SoS Engineering)。国际上还有其他大学和科研机构分别在工程系统领域和智能交通系统方面,能源开发、电力网络传输等方面开展了体系结构设计相关的研究,在软件体系结构整合度评估、体系结构风险评估和体系结构设计方面取得了大批研究成果。

尽管如此,到目前为止,还没有成熟的理论、方法和技术来支撑体系的研究或在体系问题的解决上实施系统工程的框架,但这一思想没有得到普遍的认可,在

Eisner工作基础上 Ronald 提出了体系工程的构想,在其构想中强调体系问题的定量分析,在该方法中体系被看作一个整体,对体系的优化是基于费用代价和技术约束,其研究方法包括运筹分析、效用建模、非线性最优化和随机建模与模拟。应该说 Ronald 的工作是体系工程研究上迈出的第一步^[4]。

国际上对体系工程开展的研究刚刚起步,与体系的定义一样,不同领域的学者和工程实践人员都有不同的理解和认识,体系工程也并未形成一个权威定义。

下面是一些体系工程典型的定义^[3-8]。

定义1:体系工程是确保体系内在其组成单元的独立自主运作条件下能够提供满足体系功能与需求的能力,或者说执行体系使命与任务的能力。

定义2:体系工程是这样—个过程,它确定体系对能力的需求;把这些能力分配至—组松散耦合的系统;并协调其研发、生产、维护及其他整个生命周期的活动。

定义3:体系工程是指解决体系问题的方法、过程的统称。体系工程是国防技术领域的一个新概念,这一概念同时也被广泛应用于国家交管系统、医疗卫生、万维网及空间探索领域。体系工程不仅局限于复杂系统的系统工程,由于体系所涵盖问题的广泛性,它还包括解决涉及多层次、多领域的宏观交叉问题的方法与过程。

定义4:体系工程是学科交叉、系统交互的过程,这种过程确保其能力的发展演化满足多用户在不同阶段不断变化的需求,这些需求是单一系统不能满足的,而且演化的周期可能超越单一系统的生命周期。体系工程提供体系的分析支持,包括系统交叉的某一时间阶段内在资源、性能和风险上的最佳平衡,以及体系的灵活性与健壮性分析。

定义5:体系工程源于系统,但它不同于系统工程,是不同领域问题的研究。系统工程旨在解决产品的开发与使用,而体系工程重在项目的规划与实施,换句话说,传统系统工程是追求单一系统的最优化(例如某—产品),而体系工程是追求不同系统网络集成的最优化,集成这些系统以满足某—项目(即体系问题)的目标。体系工程方法与过程使得决策者能够理解选择不同方案的结果,并提供给决策者关于体系问题有效的体系结构框架。

定义6:体系工程解决体系中的系统的集成,最终

为社会基础设施的发展做出贡献。

定义7:美国国防采办手册定义体系工程是对一个由现有或新开发系统组成的混合系统的能力进行计划、分析、组织和集成的过程,这个过程比简单的对成员系统进行能力叠加要复杂得多,它强调通过发展和实现某种标准来推动成员系统间的互操作。

定义8:美国体系工程研究中心指出体系工程是设计、开发、部署、操作和更新体系的系统工程科学。它所关心的是:确保单个系统在体系中能够作为一个独立的成员运作并为体系贡献适当的能力;体系能够适应不确定的环境和条件;体系的组分系统能够根据条件变化来重组形成新的体系;体系工程整合了多种技术与非技术因素来满足体系能力的需求。

从上面的定义可以看出,体系工程在不同领域的理解存在5个方面的共性:

- 1) 体系工程是能力集成工程。
- 2) 体系工程是复杂需求获取工程。
- 3) 体系工程是综合集成体的演化工程。
- 4) 体系工程是学科交叉、系统交互过程。
- 5) 体系工程是权衡与平衡工程。

2 体系工程过程

体系工程以解决体系的构建与演化问题为目标,其研究对象是体系,区别于系统工程所针对的简单系统对象,在过程原理上两者间存在本质的差异。

体系工程过程存在需求分析循环、设计分析循环与设计验证循环,除此之外,还存在对体系环境与边界的分析。体系环境与边界分析同需求分析循环、设计分析循环和设计验证循环并行进行,体系工程4个方面的过程分析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的方案,如图3^[8]所示。

3 体系问题有效的体系结构框架

体系工程源于系统工程,但高于系统工程,是解决系统工程解决不了的体系问题。体系工程是实现系统最优化的科学,是一门高度综合性的管理工程技术,涉及应用数学(如最优化方法、概率论、网络理论等)、基础理论(如信息论、控制论、可靠性理论等)、系统技术(如系统模拟、通信系统等),以及经济学、管理学、社会

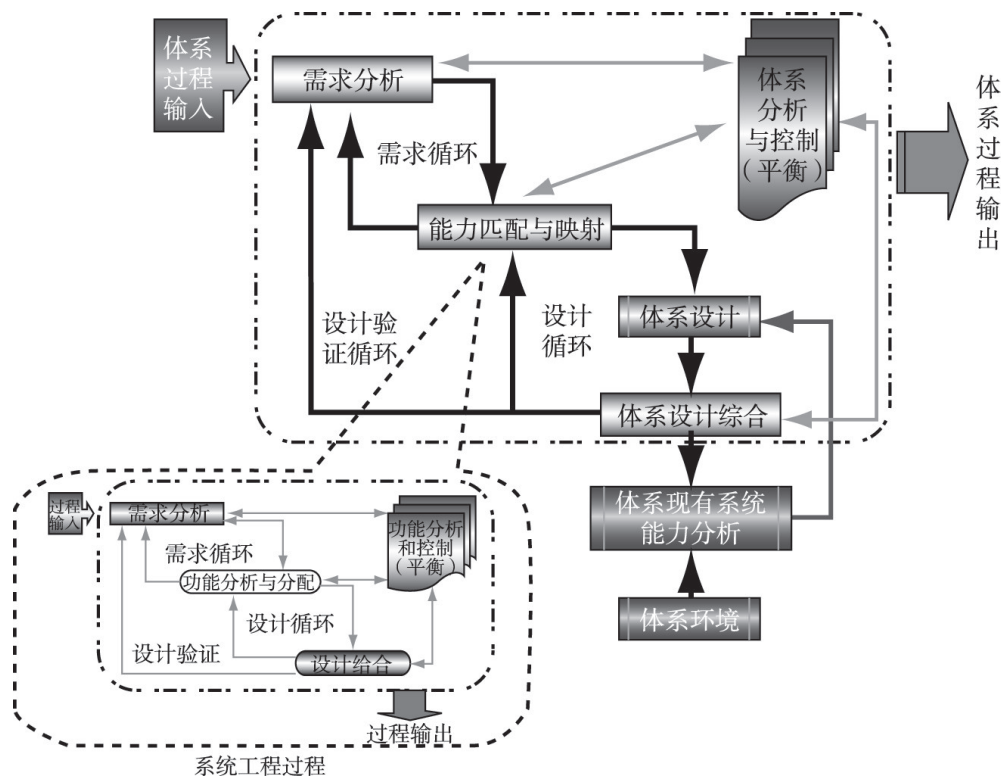


图3 体系工程过程

学、心理学等各种学科。体系工程重在项目的规划与实施,追求不同系统网络集成的最优化,集成这些系统以满足某一项目(即体系问题)的目标。体系工程方法与过程使得决策者能够理解选择不同方案的结果,并提供给决策者关于体系问题有效的体系结构框架,如图4^[4]所示。

4 体系工程的研究热点

体系工程作为近年来国际上一个新兴的热点研究领域,国外众多科研机构对其进行了深入研究。在《International Journal of System of Systems Engineering》2008年第1期文章中,总结了体系方面的13位权威专家在一次高层研讨会中得出的体系工程领域急迫需要开展研究的10个热点问题。这10个方面的热点问题将在未来引领体系与体系工程的发展,他们分别如下。

- 1) 弹性、适应能力、快速恢复能力。
- 2) 成功的案例。
- 3) 系统与体系属性的差别与比较。
- 4) 模型驱动的体系结构。
- 5) 体系结构多视图产品。
- 6) 处理复杂性中人类的局限性。
- 7) 网络中心的弱点(net-centric vulnerability)。
- 8) 演化、进化(evolution)。
- 9) 导向性涌现行为(guided emergence)。
- 10) 无单个所有者的体系(no single owner SoS)^[4]。

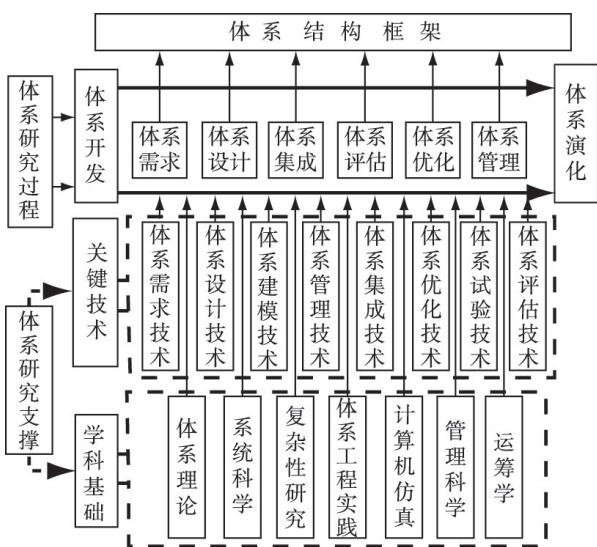


图4 体系结构框架

5 结论

人类正在面临知识经济和全球化,社会发生了很多新的变化,表现在以下3个方面。

1) 社会在变:以数据为中心转为以信息、概念、知识、智慧为中心。

2) 系统在变:从过去处理相对简单的系统变为要处理复杂系统,并进而到开放复杂巨系统、复杂自适应系统、系统的系统(体系)。

3) 技术在变:高新技术大量出现,特别是计算机和网络系统、虚拟现实、大数据、云计算、人工智能、机器人、无人机等。

为了应对以上变化,建议如下。

1) 要采用新思路、新概念和新技术。

2) 应用综合集成,要注意软、硬结合,注意东西方结合。

3) 要多学科交叉,特别要注意与系统科学、知识科学、思维科学、信息科学、心理科学等学科的交叉,知识面要宽。

4) 要人机结合,但要以人为主。

5) 要群体智慧,发挥集体和组织的智慧。

6) 要物理、事理、人理结合。

7) 还是要抓两头,发展和完善系统科学的理论,注意体系和体系系统工程的新的应用。

8) 要领会用户的需求,更要学会创造新需求。

9) 要学会新的管理方式和注意协调。

笔者最近有幸接触两起中国有关体系的实际案例,仅就其中一些值得提出的思想与大家分享。一个是中国航天工业领域中在提到他们应用体系思想解决战略规划时,说我们正从航天大国走向航天强国,也就是说过去我们习惯去参照其他航天强国提出的规划指标作为我们的参照,或者说个别地方达到高峰;那么如果到航天强国,就要整个达到高原的地步,有不少新的规划指标和标准要我们自己提出来,也就是作为战略

武器制造者,自己怎样帮助领导一起去产生新的需求,这正是系统工程与体系的一个重要区别——学会创造新的需求。另一个案例是中国船舶工业领域在讨论航母这个体系时,提出很多在航天武器领域不太考虑的“生存性”“可修复性”“进化性”等,还有体系中各个分系统之间的协调性和贡献率,特别是谁都希望 $1+1>2$,但是谁来贡献出这多于2的部分,他们具体是多少?如何去定量的评价?这些实际问题既是设计和管理人员应该具体地去回答,更是我们系统科学工作者应该去回答和研究的问题。

参考文献(References)

- [1] 顾基发. 系统科学、系统工程和体系的发展[J]. 系统工程理论与实践, 2008(增刊1): 10-18.
- [2] Berry B J L. Cities as systems within systems of cities[J]. Regional Science Association, 1964, 13(1): 149-163.
- [3] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. 信息时代的体系概念与定义[J]. 国防科技, 2009(3): 18-26.
- [4] 谭跃进, 赵青松. 体系工程的研究与发展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(5): 441-445.
- [5] Sousa-Poza A, Kovacic S, Keating C. et al. System of systems engineering: An emerging multi-discipline[J]. International Journal of System of Systems Engineering, 2008, 1(1/2): 1-17.
- [6] 谭跃进, 黄魏, 杨克巍. 体系与体系工程——系统工程发展的新领域[C]. 杭州: 中国自动化大会暨两化融合高峰论坛, 2009.
- [7] Jamshidi M. System of systems engineering, principles and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [8] 张维明, 修保新. 体系工程问题研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(5): 451-456.
- [9] Sheard S A. System of Systems necessitates bridging systems engineering and complex systems sciences, Third Millennium Systems[EB/OL]. [2018-3-15]. https://www.researchgate.net/publication/228868867_Systems_of_Systems_Necessitates_Bridging_Systems_Engineering_and_Complex_Systems_Sciences.

New development of systems engineering: System of systems

GU Jifa

Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract This paper introduces the origin of system of systems (SoS) and system of systems engineering (SoSE), the meaning and characteristics of SoS and SoSE, SoSE process, effective architecture framework of SoS and research hotspots of SoSE. [JP2]From the perspective of systems science and systems engineering development history, the background and main contents of SoS and SoSE are described, different viewpoints in the research work are listed, and the current research hotspots are introduced, which can be referred for researchers in this field.

Keywords system of systems; system of systems engineering; systems science; systems engineering ●



(责任编辑 王志敏)