

MBSE:系统工程的发展方向

张鹏翼,黄百乔*,鞠鸿彬

国防科技工业海洋安全体系创新中心,北京 100036

摘要 阐述了传统西方系统工程思想与钱学森系统工程思想的核心内容,引出基于模型的系统工程发展的外部条件与内在因素,包括模型驱动开发方法的推广与逐渐成熟、传统系统工程方法缺少对经验的积累和复用等。对比传统的系统工程方法,分析了基于模型的系统工程(MBSE)在系统形式化描述方面的优势及发展期望,提出应用MBSE指导信息物理系统的构建将是系统工程发展的新思路。

关键词 系统工程;基于模型的系统工程;钱学森系统工程方法;信息物理系统

建造大型工程项目,主要涉及3方面的工作:工程活动的策划,即工程项目的实施步骤;活动开展过程中的人力和资源的调配和管理;工程活动中要运用的技术和科学理论。三者缺一不可。西方在总结大型系统建造过程中形成的工程实践经验的基础上,形成了一套规范的工程建造组织管理方法,称作系统工程(system engineering)。钱学森将系统工程思想引入中国,并结合在中国的工程实践,形成了具有中国特色的系统工程思想,指导了航天乃至中国各行业的发展。

传统系统工程存在3个主要不足之处:(1)缺少项目经验积累的过程,未考虑项目经验的复用;(2)基本遵循一个先分解再集成的还原论思想的指导,对于复杂的非线性系统,分解的有效性并未得到及时验证;(3)系统工程只是一种使能技术、

总体规划技术,并不能替代系统构建所需要的具体技术本身。随着模型驱动的系统开发方法的兴起,特别是在软件领域,人们将模型驱动与系统工程相结合,提出了基于模型的系统工程方法(model based system engineering, MBSE)。该方法强调贯穿于全生命周期的技术过程的形式化建模,建立的系统模型既解决了项目经验积累和复用的问题,也通过多视角的系统顶层需求建模与系统架构建模,为复杂系统或体系的向下分解与及时验证提供了模型依据,体现了整体论与还原论的辩证统一;而针对物理层构建的各专业领域(机械、电子、流体、力学、气动等)的物理模型,也体现了对具体实现技术的描述,使系统工程不再仅仅是使能技术,还包含了完整的工程实现所需的技术集合。同时,形式化的建模还为项目利益相关方之间的交流提供了

收稿日期:2020-05-11;修回日期:2020-07-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61973282)

作者简介:张鹏翼,高级工程师,研究方向为武器装备体系工程,电子信箱:zhangpy2006@163.com;黄百乔(通信作者),高级工程师,研究方向为系统工程,电子信箱:seafury@buaa.edu.cn

引用格式:张鹏翼,黄百乔,鞠鸿彬. MBSE:系统工程的发展方向[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 21-26; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.21.002

统一的、无二义性的产品,为后续项目的重用和快速改进提供了模块化的模型支持。

以下分析西方经典的系统工程思想与钱学森的系统工程思想的核心内容,阐述 MBSE 的主要优点,并指出 MBSE 的发展方向。

1 从系统工程到 MBSE

1.1 工程、技术与科学

系统工程的初衷是在一定的资源约束条件下,如何正确地建造工程,而工程建造离不开技术及其背后的科学依据,因此系统工程研究首先需要理解工程、技术与科学的定位与它们之间的联系。

工程(engineering)产生于18世纪的欧洲,其本义是兵器制造、军事目的的各项劳作,后扩展到许多领域,例如制造机器、架桥修路等^[1]。工程可简单地定义为人们运用科学知识和技术手段,改造客观世界的过程。技术是实现目的的一种手段,它是一种装置、方法或流程^[2]。技术是对科学原理和自身经验综合运用结果。而科学是指人类探索研究感悟宇宙万物变化规律的知识体系的总称。三者之间的关系是,工程中要运用技术手段与科学知识,技术为科学发现提供了工具支持,而科学又会促进技术的更新换代。本文讨论基于模型的系统工程方法,归根到底是一种工程方法,指导工程的构建过程,在此过程中需要用到相关的技术手段和科学理论指导。

关于工程、技术和科学的关系,钱学森有独到的见解,例如钱学森把系统科学分为3个层次——工程技术、技术科学和基础科学。工程技术是指人们直接改造客观世界的技术,即系统工程;技术科学是为系统工程提供理论方法的科学,包括运筹学、控制论、信息论等;而基础科学是揭示系统客观规律的科学,称作系统学。其中 MBSE 是系统工程方法的一种,属于工程技术的范畴。

1.2 西方经典系统工程思想

西方系统工程是人们从大型工程建造过程中总结出来的最佳实践的集合。特别是随着美国的“曼哈顿工程”和“阿波罗工程”等重大项目的成功

实践,系统工程得以快速发展,形成了一套成熟的方法体系。在国际系统工程协会(INCOSE)的系统工程手册中指出,系统工程研究的目标和范围是人造系统(man-made systems)^[3]。关于系统工程有如下组织的多种定义。

1) INCOSE:系统工程是使能(enable)系统成功研制的一种跨学科的方法和途径。

2) 美国国家航空航天局(NASA):系统工程是设计、实现、技术管理、运行和淘汰一个系统的纪律性方法。

3) 欧洲空间标准化合作组织:系统工程是一个跨学科的方法,支配将需求转化为系统的总体技术工作。

综合上述定义,可以总结出系统工程的实质:系统工程是一种使能技术,一种总体技术,它的价值在于规划并指导了系统的构建过程,即需要经过哪些阶段。但它不是系统实现所依托的具体技术本身。在 NASA 系统工程手册中,将这些过程分为两大类,分别是技术过程和技术管理过程。INCOSE 系统工程手册中考虑得更为宽泛,除技术过程和技术管理过程外,还包括协议过程和组织的使能过程。其中技术过程构成了系统的生命周期阶段模型,即经典的 V 模型。追根溯源,V 模型中的阶段定义又来源于著名的霍尔系统工程三维结构(图1)。霍尔三维结构在时间维上采用还原分解的思路,逻辑维上对每一阶段采用结构化的系

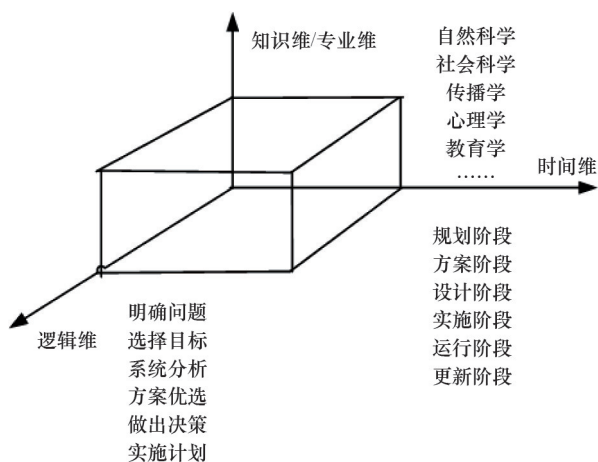


图1 霍尔系统工程三维结构

统分析的思路,知识维则明确了系统工程是一种普适的方法论。霍尔三维结构对系统工程后续的发展产生了重要影响。

1.3 钱学森系统工程思想

钱学森系统工程思想来源于西方,但结合中国型号任务中的工程实践,演化成为具有中国特色的系统工程理论。1978年,钱学森在《文汇报》上发表《组织管理的技术——系统工程》,指出“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都具有普遍意义的方法”^[4]。钱学森最初将系统工程定位为组织管理技术,这与上面提到的系统工程的实质是一种使能技术、总体技术是一致的。对应于系统工程的技术过程和技术管理过程,钱学森在航天形成了由技术线总师和管理线总师组成的型号两总制度。钱学森结合中国的工程实践经验,对西方的系统工程思想进行了扩展,主要体现在以下3点。

1) 钱学森认为,系统工程思想不仅仅只能用在人造系统的工程构建上,还是一种适合于各个行业的普适性的理论。提出了包含工程系统工程、信息系统工程、军事系统工程、经济系统工程、环境系统工程、社会系统工程等在内的14个系统工程方向。而其中的工程系统工程即对应于西方的系统工程理论。因此,钱学森的系统工程思想的内涵要比西方丰富得多。

2) 提出了总体设计部思想。钱学森指出,“总体设计部由熟悉系统各方面专业知识的技术人员组成,……总体设计部一般不承担具体部件的设计,……总体设计部把系统作为它从属的更大系统

的组成部分进行研制,对它的所有技术要求都首先从实现这个更大系统技术协调的观点来考虑,……对每个分系统的技术要求都首先从实现整个系统技术协调的观点来考虑。”^[3]西方的系统工程是一个分解以后再集成的过程,这是一种典型的还原论思想,还原论是西方学者科研的文化基因。而钱学森的总体设计部思想强调,要构建的系统需要放到它从属的更大系统层面去协调,这体现了整体论与系统论思想,强调各分系统需要放到整个系统层面去协调,这强调了还原论与系统论的结合,因此钱学森的系统工程思想体现的是还原论与整体论的辩证统一。系统不够复杂时,分解后再集成能够将系统的整体还原出来,而对于复杂非线性系统来说,系统分解后再集成未必能完整地还原出来,这时就体现出设立总体设计部来组织分解的协调和验证的重要意义了。

3) 钱学森提出的从定性到定量综合集成方法可视为MBSE思想的萌芽。如图2^[9]所示,该方法主要是针对非线性的复杂大系统而提出的系统工程方法,当定量分解已无法描述系统时,需要专家的定性经验判断与建模仿真的定量评估相结合来开展系统研究。该方法强调借助计算机技术的建模仿真实验来辅助专家的判断,因此可算作MBSE思想的萌芽,只是当时的计算机技术水平和建模方法尚未发展到能够支持完整的MBSE的地步。

1.4 MBSE的提出

MBSE是对传统的基于文本系统工程(TBSE)的一脉相承。MBSE方法的提出既有外在条件的具备,也有内在因素的推动。

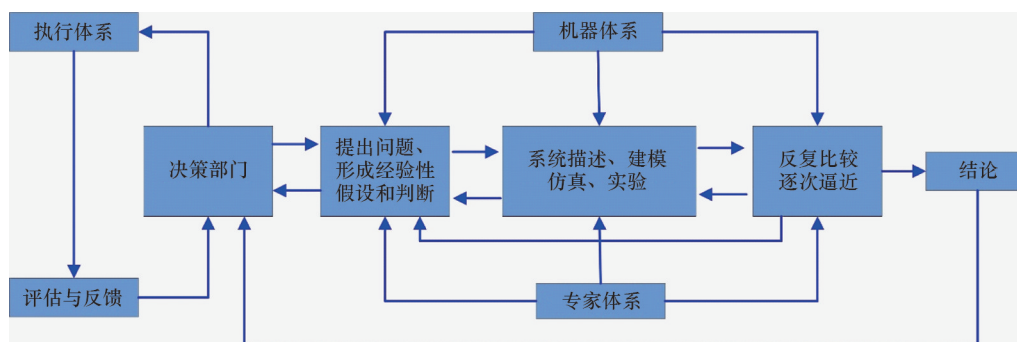


图2 综合集成方法用于决策支持问题研究

外在条件来说,工程界提出了各种模型驱动的或是基于模型的开发方法,特别是在软件领域,统一建模语言 UML 的推广使用,提出了一种规范的、无二义性的形式化描述语言,并被大家所接受,成为软件设计的标准,MBSE 中使用 SysML 语言,便是在 UML 的基础上开发出来的^[6-7]。在计算机辅助建模方面,计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)技术也已发展成熟,各专业领域的仿真建模技术也发展迅速,特别是跨物理域物理系统建模语言 Modelica 的发展,为系统的物理层建模提供了方法支持^[8]。

内在因素来说,传统系统工程的 3 个不足是推动 MBSE 发展的内因。(1) 传统的系统工程缺少对工程经验数据的积累过程,而且基于文本的系统工程积累的文本不利于后续项目的重用。模块化与重用化是提高工作效率的重要创新模式,从古代的活字印刷术,到现代计算机程序中的函数、类和控件,都体现了模块化和重用化的重要性。传统的系统工程并未重视对工程经验数据的积累,在 INCOSE 的《系统工程手册》2015 年第 4 版中已有改观,在组织的项目使能过程中已经增加了知识管理过程。(2) 传统的系统工程基本遵循一个先分解再集成的还原论思想的指导,随着研究的系统越来越复杂,特别是出现了系统的系统——体系后,对于复杂非线性系统没有很好的方法支持其分解的过程,分解后的结果是否能还原为上层系统的整体属性也未能得到及时验证。(3) 传统的系统工程只是一种使能技术和总体技术,它能使工程中使用到的具体技术更高效地实现目标,但毕竟不能替代具体技术。MBSE 正好弥补了传统的系统工程在这 3 方面的不足,成为 MBSE 发展的内在动力。在下面对 MBSE 优势的介绍中将详细阐述。

MBSE 源于软件领域的成功实践。IBM 提出了 Rational 集成系统/嵌入式实时开发流程 Harmony,使用从 UML 演化过来的 SysML 标准化建模语言,使用需求管理工具 DOORS 和模型描述工具 Rhapsody,形成一整套完整的工具链、流程和方法的支持,使 MBSE 上升成为一种通用的方法论,并推广应用到其他系统构建的工程过程中。

2 MBSE 的优势、问题与发展期望

2.1 MBSE 实现了对系统的整体性与系统性描述

传统的系统工程归根到底还是一种还原论思想,通过先分解再集成的方式,将大问题分解为小问题,逐个解决后再汇集成整个问题的解。因此,虽然称作是系统工程,但并未真正体现系统论与整体论的思想指导。而且只能通过生命周期后期的确认手段来检验集成后的系统对顶层需求的符合情况,这中间的环节太多,一旦有不符情况出现,修改的成本太大。特别是随着研究的系统越来越复杂,在工程领域出现了系统的系统,即体系。如果继续采用传统的系统工程方法来执行,采用功能与结构分解图的方式来支持分解工作,对于顶层能力的分解过程与集成后的确认过程都将变得困难。

好在 MBSE 中采用的美国国防部体系架构框架(DoDAF)系统架构描述标准,提供了多视角的体系架构描述方法,从全景视点、能力视点、作战(业务)视点、服务视点和系统视点等 8 个方面来完整描述系统,使得从整体上描述复杂系统或体系成为可能,满足了系统工程方法的系统性与整体性,使得系统工程成为名副其实的系统论指导下的工程方法。而建立的系统架构模型,也为在系统定义的早期阶段就能对系统功能分解与系统指标分解的结果进行仿真验证提供了模型支持。难怪 INCOSE 在《系统工程 2020 年愿景》中指出,系统工程的未来是 MBSE^[9]。

2.2 MBSE 形式化建模的其他优势

2007 年,INCOSE 在《系统工程 2020 年愿景》中,给出了 MBSE 的定义:支持以概念设计阶段开始并持续贯穿于开发和后续的生命周期阶段的系统需求、设计、分析、验证和确认活动的形式化建模应用。MBSE 与传统的系统工程相比,最主要的区别是贯穿于全生命周期的技术过程的形式化建模,重点在形式化,而不是有无建模。建模是一个很宽泛的概念,文字描述也可以认为是建模手段的一种,但是非形式化的。形式化的建模有诸多优点:

1) 描述严谨,无二义性,便于沟通交流。这也是 SysML 的前身——UML 称为统一建模语言的优

势所在。

2) 能从不同视角准确描述系统的行为和规律(活动图、顺序图和状态图等),便于开展各类分析工作,提高开发的质量。

3) 建立的模型能支持动态执行,提高了各类验证和确认活动的效率。

4) 形式化模型包含了足够的信息,可以支持模块化和重用,也为快速实现设计改进提供了技术途径。

2.3 MBSE 的难点与问题

虽然说 MBSE 具有诸多优势,但在组织内部深度推广 MBSE 方法还存在一些难点与问题,主要体现在:(1) 形式化建模过程具有一定的技术门槛,需要用到 SysML 与 Rhapsody 等建模工具以及工具背后的建模方法理论指导,要让熟悉了以文档作为描述工具的技术人员将文本描述内容转换为形式化模型需要一个较长时间的学习与适应过程;(2) 模型是对现实对象的简化处理,建模过程存在对对象特征的取舍,取舍后建立的模型是否能真实地反映现实对象的本质属性是模型验证面临的重要问题;(3) MBSE 涉及多个领域的建模技术,建模不仅仅是设计过程中的逻辑域建模,还包括物理域建模,而物理域建模与物理实体对象的各项物理机理相关。以无人机为例,包含电动控制、机械、空气动力学等多个物理领域机理,这些领域机理模型的建立需要以积累大量的实测数据作为基础,加大了推广 MBSE 的难度。

2.4 MBSE 的发展期望

如果说 MBSE 是系统工程的未来,那么信息物理系统(cyber physical system, CPS)就是系统的未来。如何使二者结合起来,应用 MBSE 方法支持信息物理系统的构建是 MBSE 未来的发展方向。

信息物理系统通过构建一套信息空间与物理空间之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能体系,解决系统运转过程中的复杂性和不确定性问题,提高资源配置效率,实现资源优化^[9];并通过信息虚体中的学习提升,不断总结系统的运行规律,将系统中的显性数据与隐性数据转化为优化物理实体的知识,实

现“虚体”与“实体”之间的学习反馈闭环,促进系统的螺旋上升。其目标图像是在信息空间构造物理实体系统对应的虚拟系统。物理信息系统的构建是对当前主要先进技术的综合运用,其技术架构如图 3^[10-11]所示。

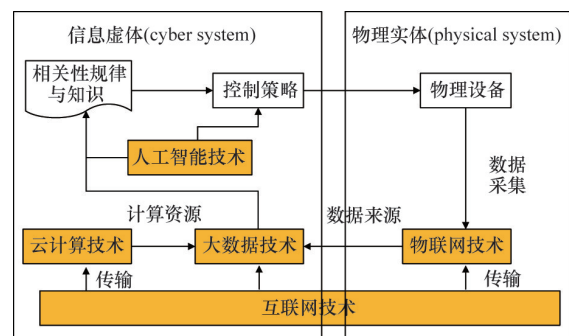


图3 信息物理系统技术架构

构建信息物理系统的关键是对物理实体系统的运行规律进行建模,并在信息空间中建立同步映射模型。MBSE 中建立的系统模型将为信息物理系统的构建提供一部分模型支持。MBSE 的模型主要是系统内部运行规律的建模,对于系统与外部环境之间的交互建模,以及系统发展到体系级后,体系架构主要采用 DoDAF 标准,成员系统之间的行为建模主要采用多主体建模技术(multi agent)。因此,为了让 MBSE 能适应未来信息物理系统的构建过程,需要对其中的建模技术进行扩展,将 SysML、DoDAF 与 Multi Agent 建模技术进行融合,建立适应信息物理系统描述的模型语言。在技术过程与技术管理过程上也要考虑信息物理体系构建的特点,开发出适合体系研制的系统工程过程。

3 结论

MBSE 通过贯穿全生命周期的形式化建模,建立严谨的、无二义性、便于沟通交流的,支持动态执行的模型,这些模型既是项目经验累积的体现,可支持快速复用和快速改进,也是项目具体实现技术的体现,填补了传统系统工程只是使能技术、总体技术的缺陷,体现了系统的整体性与系统性,使得系统工程成为名副其实的系统论指导下的工程方

法。MBSE中建立的模型还是未来构建CPS信息空间虚拟模型的基础。美国国防部数字工程战略中的数字线程与数字双胞胎技术都是以MBSE为技术基础,因此无论是在军用领域还是民用领域,MBSE已经成为系统工程未来的发展方向成为人们提高工程效率,加快系统研发迭代周期的法宝。

参考文献(References)

- [1] 白春礼. 创新驱动发展战略靠什么支撑——从科学、技术、工程的概念说起[N]. 光明日报, 2014-5-15(16).
- [2] 布莱恩·阿瑟. 技术的本质[M]. 曹东溟, 王健, 译. 杭州: 浙江人民出版社, 2014.
- [3] INCOSE. Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities[M]. 4th ed. New Jersey: Wiley, 2015.
- [4] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程[N]. 文汇报, 1978-09-27(1).
- [5] 于景元, 郑新华. 钱学森系统思想和系统科学体系[J]. 体系工程, 2018, 1: 1-13.
- [6] 栾恩杰, 陈红涛, 赵滢, 等. 工程研究——跨学科视野中的工程[J]. 工程系统与系统工程, 2016, 8(5): 480-490.
- [7] 陈红涛, 邓昱晨, 袁建华, 等. 基于模型的系统工程的基本原理[J]. 航天政策与管理, 2016(3): 18-23.
- [8] 贾晨曦, 王林峰. 国内基于模型的系统工程面临的挑战及发展建议[J]. 系统科学学报, 2016, 24(4): 100-104.
- [9] 中国电子技术标准化研究院. 信息物理系统白皮书(2017)[EB/OL]. (2017-03-02)[2018-12-03]. <http://www.cesi.ac.cn/201703/2251.html>.
- [10] 张宏军, 黄百乔, 鞠鸿彬, 等. 体系生命力理论框架[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 20-26.
- [11] Zhang H J, Huang B Q, Zhang P, et al. A new SoS engineering philosophy: Vitality theory[C]//14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1-6.

MBSE: Future direction of system engineering

ZHANG Pengyi, HUANG Baiqiao*, JÜ Hongbin

Marine Safety System Innovation Center, Science and Technology for National Defense, Beijing 100036, China

Abstract After analyzing the essential characteristics and inadequacies of traditional system engineering thought and Qian Xuesen's system engineering thought, the internal and external backgrounds of model-based system engineering development are introduced, including promotion and maturity of model-driven development methods and the traditional systems engineering methods which lack accumulation and reuse of experience. Then, compared with the traditional system engineering methods, advantages of model based system engineering (MBSE) in system formal description and the future development expectation of MBSE are analyzed. It is pointed out that using MBSE to guide the construction of cyber-physical systems will be a new idea for MBSE development.

Keywords system engineering; model based system engineering; Qian Xuesen system engineering approach; cyber physical system ●



(责任编辑 王志敏)