

基于模型的系统工程的应用及发展

邓昱晨, 毛寅轩, 卢志昂, 夏倩雯

中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048

摘要 随着基于模型的系统工程(MBSE)的概念在中国广泛普及, 选择适当的领域和问题开展应用实践、探索可操作的实施路径成为当前工业部门推动其落地实施的关键问题。结合国内外MBSE的典型应用实例, 总结了不同领域应用实践的问题和效果, 剖析了中国实施MBSE面临的难点, 并从目标设定、标准制定和实践队伍构成等方面提出了有关对策建议。

关键词 系统复杂性; 基于模型系统工程; 系统验证

近年来, 各国复杂工程系统的研制任务数量在大幅增加, 涉及的学科、子系统数量增多, 性能指标要求不断提升, 系统的复杂性不断提高, 而研制成本更是居高不下。美国国家航空航天局(NASA)在2011年指出, 系统工程未来将会面临严峻问题^[1]: 一是航天工程规模与复杂性逐年增长, 而工程师处理复杂系统问题能力的增速却跟不上系统复杂性的增长速度; 二是利用自然语言并基于文档载体的系统描述, 难以使设计人员充分洞察系统层的交互、系统级的特征和潜在的风险; 三是各类文档报告数量多、相互独立、缺少逻辑性, 在系统项目各阶段之间及项目之间难以实现知识的继承与复用。美国国防工业协会(NDIA)在2013年年终报告中同样分析了系统工程面临的问题, 除了指出与NASA报告中相似的问题, 还指出系统工程存在着工作成果利用性和移植性差、不同领域具体工作的颗粒度与成熟度差异大, 从而难以集成的问题。

随着计算机及信息技术及各领域工程技术的快速发展, 运用面向对象、图形化、可视化的系统建模语言描述系统变得越来越容易, 模型在系统研制工作中所占的应用比重也越来越大, 基于模型的系统工程(model-

based systems engineering, MBSE)应运而生。MBSE方法可有效地解决基于文档的系统工程方法在参数获取及技术状态管理中面临的问题, 是有效处理系统复杂性的利器, 目前在海外航空、航天、船舶等领域均已获得广泛应用, 在中国也是广受关注的研究与实践热点。

1 MBSE 发展历程

20世纪中后期, 众多学者对完善的系统模型理论进行了深入的研究, 发展出了各种体系化的建模思想及理论^[2], 代表性的系统模型理论有塔斯基建模理论、Kli^[3]与Lin^[4]的一般系统方法论、纳姆公理化设计理论^[5]等。过去的数十年间, 学者们在研究模型理论领域取得了显著成就, 形成了众多基于模型的方法来对系统进行描述、分析和设计。在实践中, 一些以数学逻辑为基础, 更加直观、易于理解, 且便于交流的图形化建模方法开始逐渐应用于软件工程、系统工程之中。

1993年, 美国学者Wymore在《基于模型的系统工程》中, 提出了通过严格的数学表达式对系统工程过程中各种状态和元素进行抽象表达的方法^[6], 并且还以数

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-12-28

作者简介: 邓昱晨, 高级工程师, 研究方向为系统工程、体系工程, 电子邮箱: yuchen_deng@126.com

引用格式: 邓昱晨, 毛寅轩, 卢志昂, 等. 基于模型的系统工程的应用及发展[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 49-54; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.07.007

学形式的模型体系建立了系统工程中各种状态元素之间的联系,这是面向系统工程的模型化描述方法的雏形。1997年,对象管理组织(OMG)发布了统一建模语言(unified modeling language, UML)用于软件工程过程的建模,以提高软件开发效率、降低开发成本。UML在软件工程中的成功推动了系统工程界对模型化方法的认可,即使用可视化且可执行的标准建模语言来提升系统工程过程的效能。2003年,OMG在UML的基础上进行了扩展与再开发,提出了系统建模语言(systems modeling language, SysML)作为系统工程的标准化建模语言,这为MBSE的实际应用提供了现实可行的实现途径与技术支撑。

2007年,国际系统工程学会(INCOSE)在《系统工程2020愿景》中提出MBSE的定义:“对系统需求、设计、分析、验证与确认等活动的建模行为的形式化与标准化的应用,这种建模应用从系统概念设计阶段开始并贯穿系统开发及之后的生命周期。”^[7]INCOSE强调,MBSE是未来系统工程方法与技术的发展趋势,是系统工程领域的一次变革,并在会议上首次提出MBSE远景规划,计划2007—2020年实现MBSE理论与实践体系的逐步成熟,这代表着MBSE将成为系统工程未来重要的发展方向。INCOSE对MBSE的规划路径如图1所示。

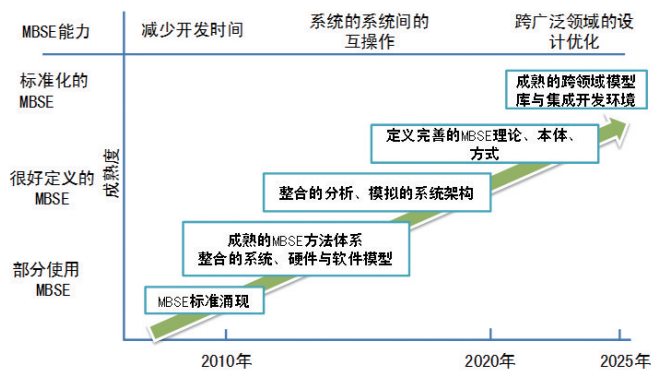


图1 INCOSE规划MBSE的发展愿景与路径

与基于模型的设计(MBD)、计算机辅助设计(CAD)等概念不同,MBSE不专注于解决具体学科设计问题,MBSE强调面向系统工程过程的建模,将系统需求、系统分析、系统设计、系统验证等过程中涉及的分析要素进行模型化并且形成有机联系,以再现系统论证与设计思路,保持全生命周期系统信息的一致性与可追溯性。一言以蔽之,MBD与CAD面向设计,而MB-

SE面向系统工程。就MBSE概念的内涵而言,“model-based”是手段,属于介质范畴,“systems engineering”是业务范畴,所以,MBSE不是一种取之即用的通用化方法,在具体应用MBSE的过程中需要将建模理念结合实际业务进行深度化的定制设计,通过明晰的系统工程业务流程的指导,用模型作为工作介质,对系统工程 workflow进行合理地组织,并以模型化的产出来表示系统工程各个工作节点的成果和结论,从而最终实现建模方法的落地实施。

2 MBSE典型应用分析

2010年,OMG对美国各家军工企业的MBSE应用情况进行调研,结果表明^[8]:47.2%的企业已经将系统建模集成进业务流程,24.1%的企业正在制定系统建模应用计划,19.4%的企业正在考虑制定计划,仅有9.3%的企业对此全无计划。此外,有66.3%的企业愿意参与到系统建模语言的完善开发工作中。德国“工业4.0实施规划”中将“利用模型掌握系统复杂性”列为8个未来重要活动领域之一。这些数据和信息表明以美国、德国为代表的工业强国充分重视MBSE,已经就MBSE开展了较为广泛的实践应用与持续创新。中国已有相关论文对部分国外案例进行说明和介绍,在此着重结合典型的MBSE应用开展的目的,对国内外部分典型应用案例进行分类分析。

2.1 通过MBSE统一系统工程描述基线

复杂系统产生的庞大信息量与数据量为系统工程活动的管理维护带来诸多严峻问题,主要体现在:众多信息分散于各个文档,难以保证完整性与一致性;传统系统工程的说明文档难以描述复杂的、动态交互性强的活动,表达力不足,有时会产生歧义,导致工程人员交流时的误解;工程细节难以维护与跟进,某处文档内容更改后,与该文档相关的文档都需要相应更改,工作量大,维护困难。而通过统一的图形化建模语言对复杂工程系统进行描述能够有效缓解甚至解决以上问题。

国外针对这类应用已开展多项工作。NASA十大中心已经明确要求系统论证交付物必须是模型,洛马公司潜艇设计团队在进行全新潜艇电子系统设计过程中花费1年时间将原来的文档全部转换为系统模型^[9],建模对象包括来自于20个项目办的35套分系统、3500条接口需求、500项服务、5000个接口实体模型、15000

条模型元素之间的关系,通过模型化描述的方式解决了其过去复杂系统工程过程中变更管理不易开展的问题。此外,美国国防部对系统工程研制模式的革新格外关注。2013年,美国国防部“负责系统工程的助理部长帮办”和“海军航空系统司令部”,联合支持美国国防部系统工程研究中心开展“通过MBSE实现系统工程转型”研究,旨在通过MBSE对现行研制模式进行全面梳理与重新组织,实现转型升级。

2.2 通过MBSE强化对复杂系统的先期验证

传统系统工程过程中,各专业设计领域利用专业模型和仿真手段对设计进行验证,但是对系统工程整体而言,对系统运行逻辑、状态的描述主要采用文本描述方式,系统整体验证主要依赖实物验证,验证周期长,技术状态无法保证,先期系统设计中的问题如果未能提前发现,待进入实物阶段后的设计修正成本极高,也会严重影响系统研制进度。采用MBSE方式,通过可执行的动态视图模型,能够在一些模型执行机制的支持下,对系统运行逻辑进行先期验证,例如IBM Harmony-SE方法,主要以“service request-driven”视角分析复杂嵌入式系统的交互和响应问题,将系统活动逻辑与状态转换逻辑转换成时序进行比对验证,从而确保系统顶层逻辑设计的正确性,进而产出功能分配方案与物理部件接口方案,并交付具体软硬件开发^[10]。另外,还可以通过SysML语言中需求、行为、结构、参数等4类模型之间元素的关联,构建起动态可执行的任务总体模型,对系统在具体任务中的运行情况进行验证,尤其是通过技术手段集成系统模型与个别专业模型以增强模型运算能力后,总体先期能力能够得到显著的增强。

针对这类应用,国内外均有开展工作。国际系统工程学会与美国国家科学基金会合作开展“曙光探测号”立方体卫星的论证、设计与研制,提出了一种通过状态机图驱动的、需求-行为-结构-参数联合运行的任务分析模型,并且集成了部分轨道设计模型(STK)以及专业计算模型(Simulink),通过设计参数与任务参数的调整能够直接观察到对于系统整体运行情况的影响^[11],极大提高了系统先期验证能力。美国国防先期研究计划局(DARPA)2014年启动的“自适应运载器制造”(AVM)项目,通过应用基于模型的系统设计/分析/验证等技术,使项目在研发初期就在模型的基础上快速论

证出可行、可靠的总体系统方案,避免了研制过程中的反复迭代,显著压缩了复杂系统的开发周期。国内中航工业与IBM公司合作,引入IBM Harmony-SE方法与整套工具体系开展航空系统工程,在其机电一体化项目“智能伺服控制系统”中,将目标系统划分为3个顶层用例,开展了Harmony-SE方法规定的需求分析、功能分析、设计综合等步骤^[12],形成包括95个状态的系统可执行功能模型,并通过仿真试验、验证、优化了系统设计。中国商飞通过使用Harmony-SE方法开展大飞机的需求-功能逻辑验证,以解决飞机需求条目众多、需求复杂、论证难度大的问题。

2.3 通过MBSE集成多专业工具链

过去在缺乏系统模型的情况下,各个专业模型较为分散,难以进行综合集成应用,多学科协同设计难以开展。系统模型能够描述系统整体性的、顶层的信息,并且从技术角度以数据、模型转换与封装手段集成多学科的专业模型,从而能够充当系统工程过程中多学科设计的集线器,通过系统模型实现多学科协同优化设计。

国内外为此开展多项工作。DARPA在自适应运载器制造(AVM)计划中深度应用了MBSE,构建了基于模型的设计、分析、验证平台,建立了组件模型库,提供了模型化和参数化的组件,以及模型化的各类运载器材料的属性库,支持运载器整体的系统设计,实现基于模型仿真与模拟验证,支持多个层面的工程分析,包括整车性能分析、人机环分析、机动性分析、可制造性分析、采购分析等,形成了全面、集成的系统工程运行环境,提高了系统工程效率。洛马公司采用MBSE来统一进行需求管理和系统架构模型,并向后延伸到机械、电子设备以及软件等的设计与分析之中,如System、ANSYS的软硬件设计与分析、Adams的性能分析、SEER的成本分析等,构建了完整的基于模型的航空航天和防务产品的开发环境,促进了工程全链条的集成。北京空间飞行器总体设计部^[13]应用MBSE理论指导航天器研制实践,基于协同设计和并行工程的理念,建立起适用于航天器复杂产品各研制阶段,支持多学科、多专业综合集成的设计环境——协同设计中心,并成立了由总体、结构、热控、结构工艺、总装工艺等相关技术人员组成的集成产品开发团队(IPT),通过协同设计中心开展航天器协同研制。

3 中国MBSE实施难点分析与思考

3.1 MBSE实施涉及范围广、专业多,协调难度大

从国外MBSE的实践经验来看,要发挥MBSE的优势与效果,并不能只停留在系统工程本身,或是仅实现系统工程实施过程中的总体设计文档模型化,而是要针对具体问题将MBSE涉及的系统工程规范标准、技术平台和人员集成为相互连通、逻辑闭合的整体。例如,要运用MBSE实现对复杂系统设计中各类信息的管理,在技术上需要实现MBSE平台与当前的需求管理平台、产品数据管理(PDM)平台等的互联互通,在管理上要实现总体与分系统等各相关单位接受以MBSE方式表述的系统设计要求与设计结果;要运用MBSE实现对总体方案的早期论证,在技术上需要将任务仿真系统与MBSE平台连接,在管理上需要在早期实现对军方需求的确认与对接。上述MBSE实践中所遇到的技术与管理工作是确保MBSE发挥效果的前提条件,同时也是制约MBSE实施的难点问题。这是因为,系统工程的实施主体是总体部,总体部往往是最有动力开展MBSE实践的部门,但是要落实上述基础性工作仅仅依靠总体部是难以实现的,需要任务需求方、各配套单位、信息化部门、业务主管部门的协调与配合,任何环节的缺失都会极大地影响MBSE实施效果的展现,挫伤领导推行MBSE的信心与决心,甚至导致MBSE实施工作的全面失败。

3.2 实现系统工程的标准化、规范化工作难度大

MBSE诞生之初就有严密的数学逻辑作为支撑。与其说实施MBSE实现了系统工程过程的标准化与规范化,不如说标准化与规范化的系统工程是实现MBSE的基础。MBSE并不能自动将原本并不清晰的设计变得内容详实、逻辑严谨,而是通过模型化的表述与信息化的验证手段,倒逼设计人员将原本没有清晰阐述的设计思想按严格的论证过程表述出来,从而实现论证过程与结果的紧耦合和全透明。当前,对于系统的理解为设计的艺术,对于系统工程研制程序的精确化提炼不足,对系统工程中每个步骤、阶段产出的颗粒度、产出形式等把控依然普遍依赖总师与各级设计师的经验,规范的、指南性的系统工程运行标准尚不完善。系统工程标准化与规范化的不足成为制约MBSE实施的重要瓶颈。MBSE的倒逼机制,要求设计人员在实施MBSE的过程中必须对以往的系统工程过程进行

再审视、再梳理和总结,然而过去没有阐述清楚的实现过程往往就是最难以明确表述的部分,这种再审视的过程进一步增加了设计人员落实MBSE的工作难度,如何在MBSE实施中获得对这些工作的广泛理解与支持,也是设计人员不得不面临的挑战。

3.3 系统研制人员学习与转型成本大

MBSE并不是单一工具,而是一套完整的系统工程方法,所以系统研制人员实现MBSE转型需要付出很大的转型成本。转型成本体现在两个方面:一是运用MBSE的过程必须与具体的业务领域相结合,目前没有一套放之四海而皆准的方法可以指导各领域的MBSE实践,这就意味着探索MBSE方法是一个试错的过程,需要在不同的路径中权衡比较,甚至回到起点重新出发,试错过程中面临的风险是MBSE实践人员不得不承担的成本;二是在转型过程中,MBSE实践人员必须从零开始构建完整的MBSE实现体系,例如MBSE的模型库、模型描述规范、计算公式等。理论上,MBSE能够提高总体设计的效率,但是这些繁琐的工作是提升效率的前提,也是MBSE实践过程中必须付出的成本。方法探索中的不确定性和额外增加的工作量构成的转型成本很容易引发一线研制人员的反感,进而影响MBSE的落实。

4 中国MBSE发展对策建议

4.1 坚定信念,逐步实现MBSE转型

MBSE是系统工程的重大转型,技术、管理、标准、人员思想等方面都需要作充足的准备,任何单位都不可能一蹴而就。NASA的喷气推进实验室(JPL)通过7年时间才初步实现MBSE,国际系统工程协会推行MBSE的规划长度也达到了10年。尽管当前有国内外实施MBSE单位的先行经验可以借鉴,但是真正实现全面的MBSE转型仍将是一个较长的过程。面对这种情况,要实现MBSE需要坚定信念,能够耐得住转型过程。在工作开展方面,既要制定长远的目标作为牵引,同时在各阶段要提出明确的阶段目标,以当前系统工程中面临的一两个难点问题为抓手,合理控制MBSE的实施范围,集中资源攻克制约MBSE实施的各项瓶颈问题,打牢实施基础,充分展现实施效果,以此来强化实施MBSE的信心,确保各阶段的突破和长远目标的实现。

4.2 系统工程标准化、规范化提炼研究必须和模型化研究并行迭代推进

实施 MBSE 需要同研制领域的特点相结合,立足中国系统工程实际开展研究推进。第一个方面是针对现行部分依赖各级研制人员经验与智慧的非规范化过程进行重新梳理并且实现标准规程的凝练,达到系统工程业务本身的规范化、标准化,这一方面也构成模型化的基础与土壤;第二个方面是在规范化凝练的系统工程过程基础上,研究探索与之匹配的标准化建模 workflows 的标准与规范,对系统工程各阶段建模内容、各阶段建模颗粒度、产出形式等基本问题进行标准化定义。通过这两个方面的并行推进研究,形成匹配相关研制领域现状与习惯的 MBSE 标准方法,确保方法研究与现实需要的紧密联系,形成适合中国系统研制现状、匹配中国军工研制特色文化与习惯的、可用、易用、好用的 MBSE 方案与标准,提高 MBSE 方法应用的有效性,加速 MBSE 的落地实施。

4.3 建立项目团队,减轻研制人员的 MBSE 转型成本

要实现 MBSE,必须建立由软件供应商、MBSE 专业咨询人员和总体设计人员共同组成的项目团队:软件供应商负责实现 MBSE 建模工具与各工程领域设计分析软件的集成,实现模型的自动传递,减轻一线研制人员的负担;MBSE 专业咨询人员负责为研制人员提供方法探索的指导,也可以帮助总体设计人员构建建模的基本单位,使得研制人员能够专注于本领域业务相关的设计工作,降低转型成本,构建适合开展 MBSE 研究推荐的高效组织,各司其职、各取所长加速 MBSE 研究与应用推进。

5 结论

经过近 10 年的发展,MBSE 在国外工业界已经获得了广泛的应用,当前也已成为中国的研究热点。相比传统系统工程,MBSE 利用模型描述系统,从而充分发挥模型优势,提升了系统全周期信息表述的一致性,增强了系统功能性能的先期验证和多学科协同优化设计能力。但是,落地实施 MBSE 面临着协调范围广、学习转型成本大和筑基工作多等挑战。因此,实现 MBSE 转型需要以阶段明确的长远规划为引导,以系统工程标准研究与 MBSE 建模方法研究同步推进为策略,以 MB-

SE 研究人员、型号研制人员和软件供应商三方人员的团队为主要力量,从而构建起转型的坚实基础,推动 MBSE 的落地实施。

参考文献(References)

- [1] Michael R, Stephen K. NASA systems engineering challenges [R]. Washington DC: NASA PM Challenge, 2011: 1-11.
- [2] Charles E D, Dimitri M. A brief history of models and model based systems engineering and the case for relational orientation[J]. IEEE Systems Journal, 2009(11): 6-11.
- [3] Klir G. Facets of systems science[M]. New York: Plenum, 1991: 56-80.
- [4] Lin Y. General systems theory: A mathematical approach[M]. New York: Kluwer Academic, 1999: 37-62.
- [5] Suh N P. Axiomatic design theory for systems[J]. Research in Engineering Design, 1998(10): 189-210.
- [6] Wymore A W. Model-based systems engineering[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993: 39-50.
- [7] International Council on Systems Engineering (INCOSE). Systems engineering vision 2020[R]. Seattle, WA: International Council on Systems Engineering, 2007: 5-32.
- [8] Cloutier R, Bone M. Compilation of SysML RFI-final report[J]. Stevens Institute of Technology, Technology Report, 2010: 97-102.
- [9] Steven W M. The challenge of managing enterprise-scale models in MBSE[R]. Bethesda: Lockheed Martin Corporation, 2015: 1-21.
- [10] Hoffmann H P. MBSE with rational rhapsody and rational harmony for systems engineering[M]. New York: IBM Software Group, 2011: 19-31.
- [11] Kaslow D, Soremekun G, Kim H, et al. Integrated model-based systems engineering (MBSE) applied to the Simulation of a CubeSat mission[C]//2014 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-14.
- [12] 鄢永军. 体系化推进系统工程流程、方法和工具平台在航空产品开发中的应用[J]. 航空制造技术, 2014(18): 17-22.
Qie Yongjun. Systematically promote application of system engineering process, method and tool platform in aviation product research and development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(18): 17-22.
- [13] 韩凤宇, 林益明, 范海涛. 基于模型的系统工程在航天器研制中的研究与实践[J]. 航天器工程, 2014(23): 119-124.
Han Fengyu, Lin Yiming, Fan Haitao. Research and practice of model-based systems engineering in spacecraft development[J]. Spacecraft Engineering, 2014(23): 119-124.

Analysis of the development of model-based systems engineering application

DENG Yuchen, MAO Yinxuan, LU Zhiang, XIA Qianwen

China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China

Abstract Model-based systems engineering which plays a fundamental role in dealing with system complexity becomes a hot topic in the systems engineering field, and it is a guarantee to promote engineering capabilities in the future. This article begins with the concept and evolution history of model-based systems engineering, then analyzes the application of MBSE through domestic cases as well as overseas. Finally, difficulties and countermeasures for China's future model-based systems engineering development are discussed.

Keywords system complexity; model-based systems engineering; system verification ●



(编辑 徐丽娇)