

基于模型的系统工程在航天产品研发中的研究与实践

张 兵, 陈建伟, 杨 亮, 肖 进

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 目前, 基于模型的系统工程 (MBSE) 在工业界尤其在复杂装备领域, 受到广泛关注。利用 MBSE 技术, 发达国家在提升航天产品制造效率、生产力及装备的开发和部署上已经走在了世界前列。因此, 深入理解 MBSE 概念, 发展适用于我国航天工业的 MBSE 技术迫在眉睫。对 MBSE 概念及发展现状进行了深入分析, 并结合初步实践经验, 提出了航天 MBSE 技术发展方向和建议。

关键词: MBSE; 系统工程; 航天产品

中图分类号: V57

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2021) 01-0001-07

Research and Practice of Model-Based Systems Engineering in Aerospace Products

ZHANG Bing, CHEN Jianwei, YANG Liang, XIAO Jin

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Model-Based System Engineering (MBSE) has attracted wide-range attention, and its theory and methods have been applied to various industrial fields, especially that of complex equipments. By application of MBSE, many developed countries have world-class technology in enhancing the efficiency and capability of aerospace product manufacturing, and deployment of military equipments. Therefore, it is extremely urgent to deeply understand the conception of MBSE and develop this novel technique suitable to China aerospace industry. This paper analyzes the conception and current situation of MBSE, and presents development direction and proposals of aerospace MBSE technique on the basis of preliminary practical experience of engineering projects.

Key words: Model-based system engineering; Systems engineering; Aerospace product

0 引言

钱学森在《组织管理的技术——系统工程》中阐述了系统工程的定义, 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科学方法^[1-2]。

航天产品是典型的复杂巨系统, 其研制过程遵循系统工程方法。但是, 随着航天产品的系统

复杂度与集成难度越来越高, 专业间耦合更加紧密, 使得总体、分系统、单机之间指标与接口的迭代更频繁, 开展系统方案的设计与优化难度更大, 传统的系统工程方法亟需融合新技术、新手段完成升级重塑。基于模型的系统工程 (Model-Based System Engineering, MBSE) 作为一种基于模型的综合化方法^[3-4], 主要通过形式化的建模方法和标准化的建模语言构建包括需求模型、架构模型、仿真模型等在内的一系列模型, 实现

收稿日期: 2020-10-08; 修订日期: 2020-12-09

基金项目: 国防基础科研“十三五”项目 (JCKY2016203B027)

作者简介: 张兵 (1975-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为运载火箭总体设计。

“需求→功能→逻辑→物理架构”的层层分解和分配。通过建模与仿真实现需求、功能、逻辑和物理架构的“检验”和“确认”，并驱动产品设计、实现、测试、综合、验证和确认等环节。MBSE通过“系统模型可验证”的极大优势可以在项目早期通过仿真验证来减少实物验证出现的问题，极大地提高了产品研发效率和质量，同时降低研发成本和风险，使得MBSE逐渐成为复杂系统研发的必由之路。

本文在对MBSE概念及发展现状分析基础上，深入剖析了MBSE的技术内涵，并从流程、方法与工具3个方面，详细介绍了北京宇航系统工程研究所的航天产品MBSE技术研究与工程探索情况，并提出了MBSE技术与航天产品研制融合的思考与建议，为后续开展基于模型的航天产品数字化研制体系构建与研制模式转型升级提供参考。

1 MBSE 概念

2007年，国际系统工程学会（International Council on Systems Engineering, INCOSE）在

《系统工程2020年愿景》中首次给出了MBSE定义：基于模型的系统工程是对系统工程活动中建模方法应用的正式认同，以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动，这些活动从概念性设计阶段开始，持续贯穿到设计开发以及后来的所有的生命周期阶段^[5]。

目前，模型驱动的产品设计方法在机械、电子、软件等领域已经得到了应用，形成了基于模型的定义（MBD）、电子设计自动化（EDA）以及模型驱动架构（MDA）等设计模式。通过借鉴机械、电气、软件等领域的模型驱动产品研发的思想与优点，MBSE将传统系统工程理论与先进数字化技术充分结合，在方案初期便引入需求模型、架构模型等，替代研制需求、设计方案等传统设计载体，在详细设计、制造工艺以及试验测试评估等阶段，结合当前设计模式，构建CAD三维模型、电路电气模型、CAE仿真模型等，最终形成贯穿产品各研制环节的模型体系（见图1），使产品在正式试验前能够得到充分的验证，将设计质量缺陷尽可能多地提前暴露并消除。

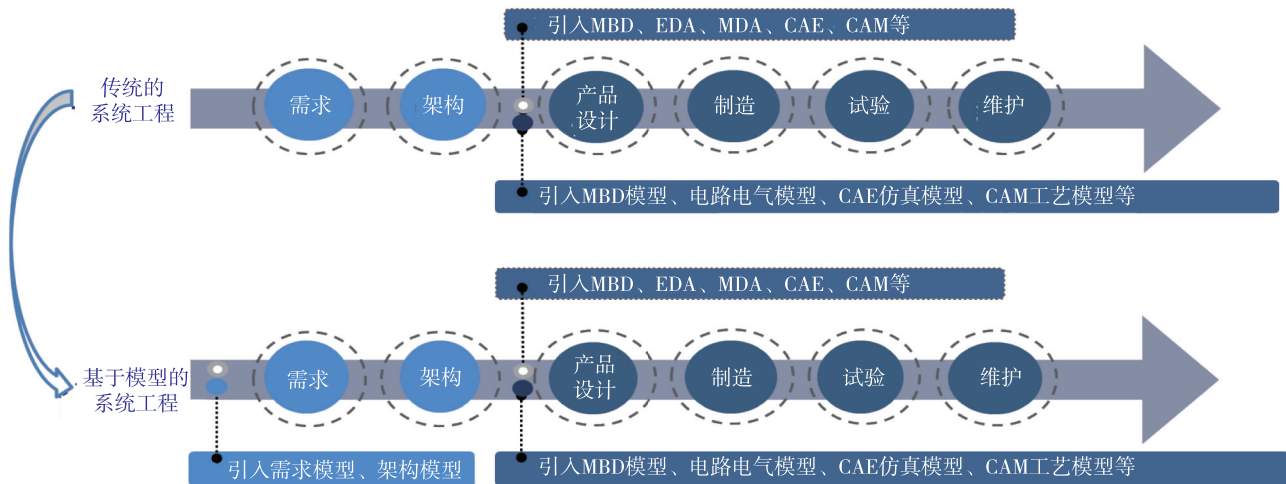


图1 基于模型的系统工程

Fig. 1 Model-Based System Engineering

从MBSE的定义可以看出，MBSE是一种方法论，体现了标准化、结构化、图形化3个特点。具体来说，MBSE采用标准化的建模语言、模型和统一应用框架，以确保研制信息的规范化；采用结构化的模型，使得计算机能有效地识别、解析、组织和关联模型，以实现信息跨层次、跨环节、跨系统的获取、转换、整合和再利用；并且MBSE采用高度图形化的方法来呈现研制信息，

能准确统一地描述系统，以提高理解的一致性和沟通效率。同时，MBSE模型能进行动态的仿真验证，例如通过SysML模型的时序图、状态机来验证系统行为、功能、逻辑的完整性和准确性，利用需求结构化建模与管理方法与工具进行需求覆盖性分析、全面性验证等，以准确评估设计方案的合理性。

因此，相比于基于文档的研制模式，MBSE

具有更直观、无歧义的信息表达，能提高协同效率，增强信息的获取、转换与再利用能力。在产品研发的早期，通过采用基于模型的架构设计、系统动静态仿真、需求指标的关联管理等数字化分析、验证与管理手段，实现设计方案的显性化与规范化分解、系统设计指标的合理性与正确性验证、需求指标的可追溯与精细化管理，能够大幅减少系统集成与验证阶段的迭代反复，力求做到产品设计制造一次成功，从而提高产品全生命周期的研制质量与效率。

2 MBSE 发展现状

1997 年，面向对象管理组织（Object Management Group, OMG）发展了“模型驱动架构”等理念，并为支持软件系统开发定义了统一建模语言 UML。20 世纪 90 年代末，波音、空客、庞巴迪、洛马、NASA、欧空局等利用数字化技术进行了大规模应用实践。2007 年，INCOSE 受软件工程巨大成功的启发，结合多年的数字化技术研究和实践结果，提出了 MBSE 概念，并在 UML 的基础上与 OMG 共同建立了标准的系统建模语言 SysML^[6]。

在产品研制需求和系统工程理论发展的推动下，国外科研机构及航空航天企业利用 MBSE 开展了大量技术研究及工程研制应用^[7-11]。NASA、欧空局（ESA）在 MBSE 标准和全生命周期应用方面做了系统性工作，并在多个项目和研发环节中开展了典型应用；波音公司采用统一的流程方法和工具全面实践 MBSE，已成功应用于波音 787 的研制；洛马、空客等公司持续应用基于模型的需求工程驱动产品研制。

此外，国外航空航天企业及软件厂商在基于模型的系统工程多个环节逐渐形成了较完备的软件工具体系，为 MBSE 的应用提供了统一的研制支撑环境。例如美国 IBM 公司开发了一系列基于模型的需求、架构开发及管理工具（DOORS、RTC、Rhapsody 等），法国达索公司和德国西门子子公司分别利用 3DEXperience 平台、Teamcenter 平台，打通了 MBSE 模型体系相关建模与设计工具间的接口，实现多域多学科协同管理等^[12-15]。

随着国外对 MBSE 应用的大力推动，国内也不断尝试将 MBSE 应用于各领域。中国航空工业集团在歼击机等产品开展不同程度的 MBSE

工程应用；中国运载火箭技术研究院研究了需求结构化管理与协同、架构设计与系统仿真闭环验证等关键技术；中国空间技术研究院成立院级 MBSE 小组开展方法研究；中国飞航技术研究院由院科研生产部组织导入方法，并启动 MBSE 软件平台研发工作^[16-17]。

结合国内外发展情况可以发现，目前国内的 MBSE 研究相对起步较晚，与国外 MBSE 技术的研究和应用相比还存在较大差距。

3 面向航天产品研发的 MBSE 工程研究

当前我国航天产品是以文档为主、模型为辅的协同研制模式开展工程实施。近年来，虽然已经形成了以三维模型为核心的结构系统协同研制模式，但从全周期、全业务、全系统的角度来看，航天产品研制依旧停留在基于文档的协同阶段。因此，亟需从源头出发，率先突破航天产品需求分析过程模型化的技术可行性，逐步建立航天产品的完备模型体系，为实现航天产品研制全生命周期的数据贯通奠定基础。

近年来，北京宇航系统工程研究所首先在需求分析过程模型化、研制流程体系化等方面进行探索研究，为在航天产品研制中 MBSE 技术的应用赋予了新的内涵，主要可归结为“流程”“方法”“工具”3 个方面（见图 2），并在多个运载火箭型号研制过程中，开展了 MBSE 技术的工程探索实践。

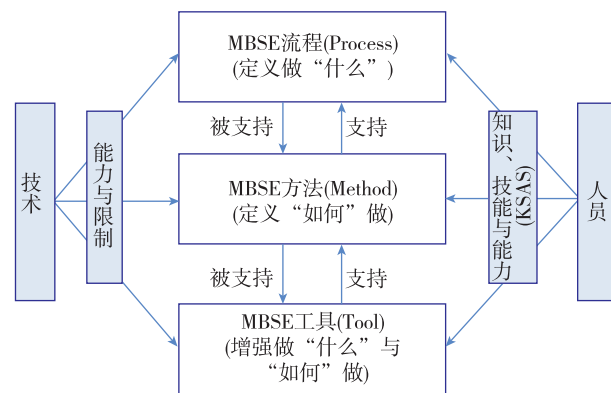


图 2 MBSE 流程、方法与工具

Fig. 2 Process, method and tool of MBSE

3.1 航天产品 MBSE 流程应用研究

MBSE 流程是为了实现一个特定目标所执行任务的逻辑序列，它定义将要“做什么”。近年

来,北京宇航系统工程研究所开展了航天型号研制体系重构工作,主要采用精细化流程的思路,提出“再现、再造、持续完善”的工作步骤,实现研制流程的层次化、体系化与规范化,为研制流程体系的重塑及研制模式转型升级提供支撑。

MBSE 流程模型如图 3 所示。首先,按照研制体系再现的思路,开展研制流程梳理,采用“岗位、

阶段”两维度流程图的方式,分级细化梳理形成包含 3 个层级的型号研制流程体系。在流程中明确质量控制要点,形成设计流程图,并以此为脉络细化成最小流程步,构建流程模型,该流程模型包含 4 个要素:输入数据、输出数据、合规要求和支撑条件。同时,以流程模型为索引,构建文件体系、数据体系、知识体系、质量要求和标准规范体系。

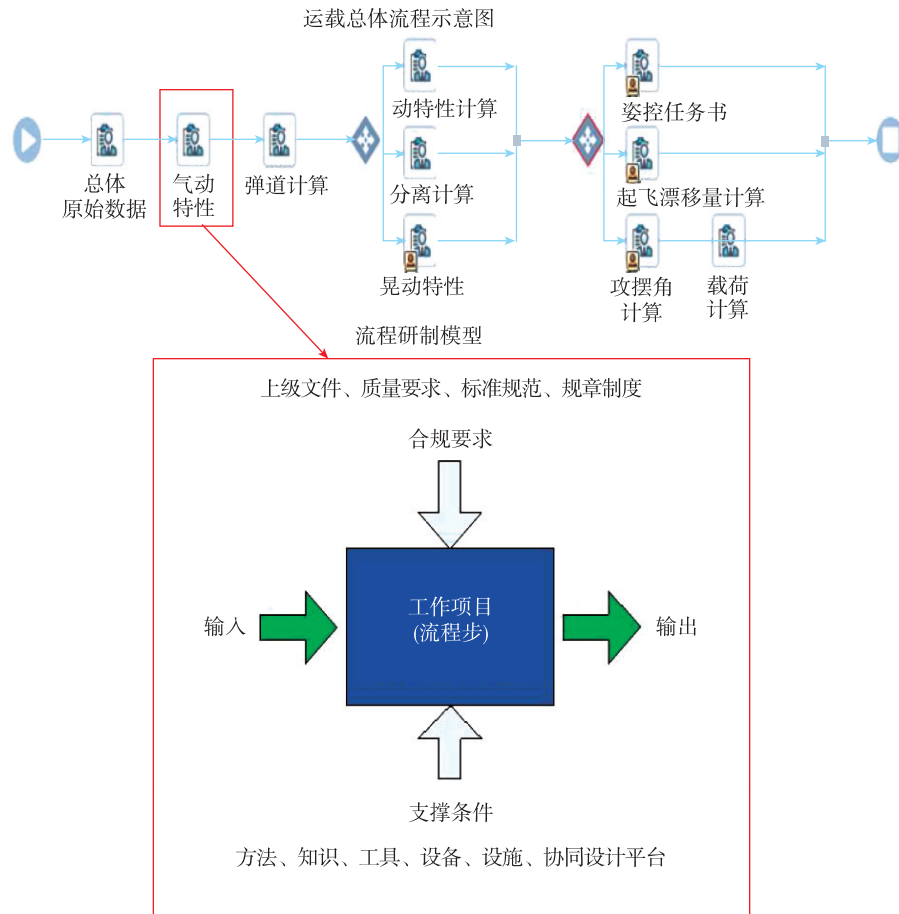


图 3 MBSE 流程模型

Fig. 3 Flow model of MBSE

然后,开展研制体系再造工作,按照“确定新要素→形成活动清单→嵌入研制流程”的步骤,将需求管理、架构设计等 MBSE 新要素分别进行技术与活动梳理,形成两维度工作流程图以及流程活动清单,将这些活动嵌入到相应的分级流程中,实现将 MBSE 新要素融入研制体系。

最后,在上述两步基础上,通过航天型号的工程应用实施,持续改进完善基于 MBSE 的研制体系,推动实现新研制流程体系的健全与发展。

通过引入流程模型,不仅可实现型号研制流程体系的层次化、结构化与精细化,还可推动研

制过程方法、工具、知识等要素的无缝融合,提升研制工作的规范性与质量管控能力,同时有助于实现输入输出数据的标准化,形成基于流程的数据图谱,便于查找与追溯。

3.2 航天产品 MBSE 方法应用研究

MBSE 方法是指执行一项任务的诸多技能组成,它定义“如何”执行每项任务。结合传统设计方法,北京宇航系统工程研究所形成一整套面向航天产品研制过程的数字化研制技术体系,实现研制能力、研制效率及产品质量的全方位提升。

以探索型号基于模型的正向设计与验证为目

标，面向产品方案设计过程，首先形成标准化顶层需求；然后通过架构设计进行需求指标的规范化、显性化分解；最后，利用架构模型驱动系统仿真，开展需求指标分解的合理性验证，如图 4 所示。通过“需求-架构-仿真”不断迭代闭环验证，有效解决需求协同管理、系统设计集成与验证等问题，促进形成基于模型的协同设计新模式。

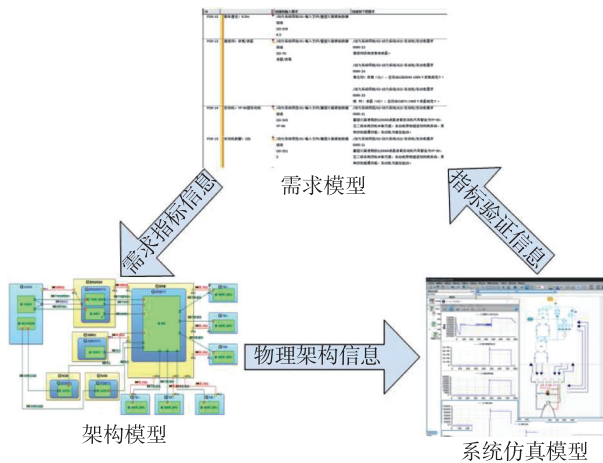


图 4 MBSE “需求-架构-仿真”迭代闭环验证

Fig. 4 Iterative close-loop verification of MBSE requirement-architecture-simulation

通过构建 MBSE 需求模型（见图 5），一方面，能够将当前研制需求的指标信息进行基于统一数据源的精细化管理，有助于解决需求指标信息提取与查找困难的问题，从而进一步完善技术状态管理。另一方面，能够为产品设计提供可追溯的证据链条，有助于提升需求指标的追踪与变更影响性分析效率，有效开展技术与产品风险的辨识与控制。

需求类型	对象类型	成熟度	优先级
1 前言	目标		
2 系统组成及原理	原理		
二级增压输送系统数据源(图)	原理		
增压工作原理：二级增压系统由增压泵、增压机、增压引气系统、增压引气系统组成。增压引气系统由增压引气系统组成。	原理		
增压工作原理：二级增压系统由增压泵、增压机、增压引气系统、增压引气系统组成。增压引气系统由增压引气系统组成。	原理		
增压工作原理：二级增压系统由增压泵、增压机、增压引气系统、增压引气系统组成。增压引气系统由增压引气系统组成。	原理		

图 5 MBSE 需求模型

Fig. 5 Requirement model of MBSE

基于架构模型的正向设计方法是在统一系统架构下，完成研制需求向系统功能分解、产品结构分解的正向推演，应用 SysML 系统建模语言，

基于需求模型完成对设计指标、接口、功能结构等标准化建模和结构化存储，实现图形化、显性化、逻辑闭合的设计方案表达。MBSE 架构模型如图 6 所示。

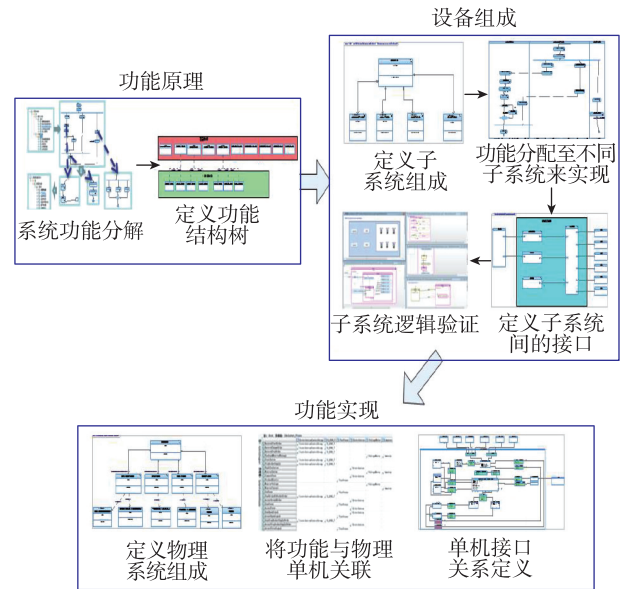


图 6 MBSE 架构模型

Fig. 6 Architecture model of MBSE

架构模型的使用，可将各类设计经验、知识等以图形化的形式固化下来，实现知识经验的传承、积累与重用，同时还能够将接口信息进行规范化分类与管理，并能针对航天产品设计活动及具体指标进行完整性与合理性分解，确保无遗漏，有利于设计过程的质量管理与风险控制。

基于模型的系统仿真验证方法是应用标准化仿真建模语言，按照产品组成完成关键单机的结构化、图形化建模及验模，并利用架构模型构建生成系统仿真模型，以实现异构仿真模型在统一架构下的集成验证。

通过构建架构驱动的系统仿真模型（见图 7），实现了系统性能指标快速验证，加强了跨系统、跨专业的方案变更影响分析能力与变更追溯能力，最终形成了“需求-架构-仿真”的数字化研制链路，实现研制需求到设计验证的闭环迭代的数字化管控，有效提升设计方案的质量。

3.3 航天产品 MBSE 工具建设研究

MBSE 工具是一种载体，当被用于特定方法时，通过固化“做什么”和“如何做”来增强执行任务的效率。针对航天产品研制过程，北京宇航系统工程研究所开展设计工具的集成方法，具

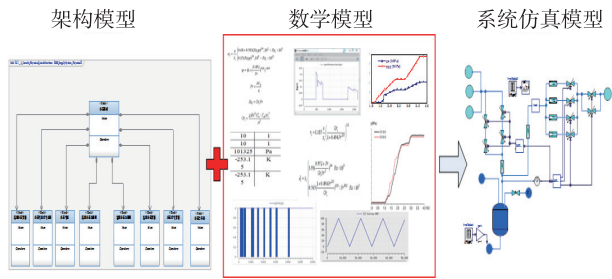


图7 MBSE系统仿真模型

Fig. 7 System simulation model of MBSE

备多专业协同设计仿真能力,并在此基础上逐渐形成与工具体系对应的数据、模型、知识资源体系,从而为先进数字化研制模式的探索与落地提供产品支撑。

在工具体系建设方面,通过统一的基础框架实现数字化协同设计平台、知识库、工具库等信息系统的集成。该工具体系的主体思想是“统一入口、流程驱动、线上协同、知识推送”,将协同过程显性化,实现设计活动的可追溯,实现多专业、多领域协同,从而为MBSE应用实施提供基础,完成方案论证实践探究。

在上述3方面的工程探索研究基础上,北京宇航系统工程研究所充分结合航天产品的研制特点,详细规划航天产品MBSE技术发展路线,编制基于MBSE的航天产品数字化大纲、统一化规定、标准规范与管理办法等指导性文件,逐步推进MBSE流程、方法与工具的工程试点与融合应用。

4 航天产品MBSE应用发展启示

如何推进MBSE工程应用,实现数字化与航天火箭产品研制深度融合,决定了能否在航天领域数字化发展浪潮中占据优先主导权。本文结合航天产品MBSE工程实践探索,形成如下应用发展启示:

(1) MBSE方法贯穿航天产品型号研制全过程,是提升型号产品精细化设计、确保型号产品质量的重要途径

基于模型的系统工程方法强调以表征复杂系统的完备模型体系为核心,在产品全生命周期进行模型化的表达,并通过模型的不断演化、迭代递进来实现复杂系统设计。

航天型号研制贯穿基于模型的系统工程方法,是以全生命周期的产品模型为基础,以多类模型表达设计信息,并通过仿真手段实现产品的数字

化设计与验证。各类模型随着产品生命周期的推演逐渐完善,在模型体系形成的过程中,通过数据的映射来建立模型之间的关联,最终实现航天产品全生命周期内的设计信息一致性传递与追溯关系的数字化表达。应用MBSE可以使产品在研制前期得到充分的验证,将设计质量缺陷尽可能多地消除,对提升航天产品精细化设计,确保型号产品质量具有重要的意义。

(2) 全面布局、体系化推进流程、方法和工具体系建设是实现航天产品MBSE研制模式落地的必然选择

从试点应用经验来看,MBSE模式与航天传统的科研生产模式差异较大,MBSE不只是一款工具的使用,一种建模方法的具体应用,而是一种贯穿于产品全生命周期的研制理念的转换和改变。科研生产模式由传统的基于静态文档的研制模式向基于动态模型的研制协同模式和产品质量保证模式转变,对组织管理模式、设计研发活动、设计信息传递模式、验收评审模式、生产及试验模式等方面都将产生巨大的影响,需要建立与之匹配的流程体系来管理和组织。因此,在组织内推动MBSE理念的落地,必须在统一的规划下,围绕总体目标,制定切实可行的实施路线,从组织建设、流程再造、理论与方法导入、工具体系建设、型号应用等方面体系化推进MBSE。开展广泛和系统的方法培训来推动新理念和方法的导入,集中力量研究标准化模型体系和数字化研发流程规范,形成代表知识积累的数字化模型资产库,持续推进面向产品研制的平台与工具体系建设,提升业务端的模型化水平,逐渐形成本土化、自主可控MBSE平台,推动基于模型的数字化协同设计及制造的协调发展。

(3) 采取典型试点、分步实施的方式有序推进,将有助于实现MBSE技术与航天产品研发管理模式的融合

MBSE的落地应用,必然对科研生产模式产生冲击和影响,若产品研制全面转向MBSE模式,将在设计流程、设计验证工作量等方面出现众多难以预先克服或避免的问题。因此,应在体系化推进MBSE流程、方法和工具体系建设基础上,采取试点应用,由点及面的推广应用模式。

选择代表性航天型号产品开展试点应用,提炼并掌握标准模型建模、实施规范,形成应用典

型示范,推动知识体系升级,并将成熟 MBSE 技术体系向其他产品推广应用。首批采用 MBSE 开展研发的试点产品必然面对设计流程变化、工作界面调整、建模仿真验证工作量激增以及人员培训与再配置等多重转型阵痛。一次完整的产品应用转型则将带来知识体系升级、研制流程再造、质量管控体系升级等系列价值,为相关产品复用推广打下坚实基础。

5 结论

航天是高端制造行业,不仅代表着一个国家的经济、军事和科技水平,而且是国家展现综合国力、国防实力的重要手段。当前中国正由航天大国向航天强国迈进,我们需要学习、研究、应用新的设计理念和方法,并将其与中国航天实际情况相结合,将基于模型的系统工程方法与航天弹箭产品研制深度融合,形成适合中国航天产品的 MBSE 研制模式,不断提升科研生产效率和质量管控能力。

参考文献

- [1] 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(01,04).
- [2] 钱学森.智慧的钥匙——钱学森论系统科学[M].上海:上海交通大学出版社,2005.
- [3] Estefan J. Survey of Model-Based System Engineering (MBSE) methodologies [J]. INCOSE MBSE Initiative, 2008;1-70.
- [4] 朱静,杨晖,高亚辉,等.基于模型的系统工程概述[J].航空发动机,2016,42(4):12-16.
- [5] INCOSE. Systems engineering vision 2020[EB/OL]. <http://www.incose.org>.
- [6] 刘玉生,蒋玉芹,高曙明.模型驱动的复杂产品系统设计建模综述[J].中国机械工程,2010,21(6):741-749.
- [7] Gau Pagnanelli C A, Carson, R, Palmer J R, et al. Model-based systems engineering in an integrated environment [J]. INCOSE International Symposium, 2012, 22(1):633-649.
- [8] Anderson L, Cole B, Yntema R, et al. Enterprise modeling for CubeSats[C]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2014.
- [9] Kaslow D, Anderson L, Asundi S, et al. Developing a CubeSat Model-Based System Engineering (MBSE) reference model-interim status[C]. Aerospace Conference, 2015 IEEE, 2015.
- [10] Vipavetz K G, Shull T A, Infeld S, et al. Interface management for a NASA flight project using Model-Based Systems Engineering(MBSE)[C]. INCOSE International Symposium, John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [11] Wolahan A, Biesbroek R, Innocenti L, et al. Model based systems engineering applied to ESA's deorbit mission[C]. Proceedings of 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 2017.
- [12] 王崑声,袁建华,陈红涛,等.国外基于模型的系统工程方法研究与实践[J].中国航天,2012(11):52-57.
- [13] Westermann T, Anacker H, Dumitrescu R. Interdisciplinary system architecture for intelligent technical systems [C]. ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston; ASME,2015.
- [14] Cloutier R, Sauser B, Bone M, et al. Transitioning-systems thinking to model-based systems engineering: Systemigrams to SysML models [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2015, 45(4):662-674.
- [15] Holt J, Perry S, Payne R, et al. A model-based approach for requirements engineering for systems of systems[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(1):252-262.
- [16] 贾晨曦,王林峰.国内基于模型的系统工程方法面临的挑战及发展建议[J].系统科学学报,2016,24(4):100-104.
- [17] 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(3):119-125.

引用格式:张兵,陈建伟,杨亮,等.基于模型的系统工程在航天产品研发中的研究与实践[J].宇航总体技术,2021,5(1):1-7.

Citation: Zhang B, Chen J W, Yang L, et al. Research and practice of model-based systems engineering in aerospace products [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(1): 1-7.