

运载火箭基于模型的系统工程研究

杨小龙¹, 聂蓉梅²

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 阐述了航天系统工程概念的来源和实践方法, 对基于模型的系统工程 (Model Based Systems Engineering, MBSE) 概念及其发展现状进行了综述。结合运载火箭的数字化研制进展, 提出了运载火箭基于模型的系统工程设想及其可能产生的效益, 分析了需要解决的关键技术、存在的问题与挑战, 对未来发展进行了展望。

关键词: 系统工程; 建模与仿真; 数字化

中图分类号: V57

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 01-0001-07

Research on Model Based Systems Engineering for Launch Vehicle

YANG Xiaolong¹, NIE Rongmei²

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper illustrates the motivation and practice methodology of aerospace systems engineering, summarizes the research of Model Based Systems Engineering (MBSE) concept and its development. An image of model-based systems engineering for Launch Vehicle development is created, and potential benefits are presented based on current progress of its digital applications. The key technologies, problems and challenges are analyzed. The future outlook of MBSE for Launch Vehicle development is given.

Key words: Systems engineering; Modeling & simulation; Digitalization

0 引言

系统工程是保证复杂系统研制成功的重要思想和方法。国内最早关于系统工程的论述出现在钱学森撰写的《组织管理的技术——系统工程》一文中。他指出系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体, 而且这个系统本身又是它从属的一个更大系统的组成部分。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]。栾

恩杰所著的《航天系统工程运行》中, 关于系统工程的定义为: 系统工程不是工程系统本身, 而是对工程系统所要达到的目标及实现该目标的措施进行整体研究, 并对工程系统进行建造及运营的过程^[2]。《中国大百科全书·自动控制与系统工程卷》中关于系统工程的定义为: 系统工程是从整体出发合理开发、设计、实施和运用系统的工程技术。它是系统科学中直接改造世界的工程技术^[3]。《美国科学技术词典》中系统工程的定义为: 系统工程是研究彼此密切联系的许多要素所构成的复杂系统的设计的科学^[4]。美国国防部系统管理学院的《系统工程原理》中系统工程的定义为:

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-11-30

基金项目: 国家研发计划项目 (2022YFB)

通信作者简介: 聂蓉梅 (1967—), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为数字化仿真。

系统工程由两个要素部分组成,即系统工程运行的技术知识领域和系统工程管理^[4]。《NASA 系统工程手册》中提出系统工程是一门综合的、整体的学科,通过相互比较来评价和权衡各学科的贡献,形成一致的不被单一学科观点左右的系统整体^[5]。

由上述国内外权威论述可见:系统工程是构建系统的科学方法,是在多种约束下获得系统最优设计的科学方法,是保证系统能够得以工程实现的科学方法。运载火箭的系统工程也基本源于以上的系统工程思想,运载火箭系统工程组织模式由两条线构成:行政线(由总指挥牵头)以计划、调度和管理为中心;技术线(由总设计师牵头)以学术研究、系统设计与验证、技术协调为中心,实行总指挥负责制。在新的历史条件下,如何进一步优化这一模式,进一步提升研制效率、研制质量和研制效益是新一代航天人需要深入思考的问题。

1 MBSE 综述

基于模型的系统工程(Model Based Systems Engineering, MBSE)是由国际系统工程咨询委员会(International Council of System Engineering, INCOSE)提出的概念。2007年 INCOSE 在《系统工程 2020 年愿景》中给出了定义:MBSE 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,持续贯穿设计开发以及后来的所有生命周期阶段^[6-7]。MBSE 方法论被定义为彼此关联的流程、方法和工具的集合。流程定义“做什么”,方法定义“如何做”,工具支持“做什么”和“如何做”的实现。INCOSE MBSE 倡导团队的主要成员多数是从事复杂系统嵌入式软件开发的人员,其最初的理论多聚焦于嵌入式系统和软件密集型系统,后来逐步延伸到其他软件占重要地位的系统,其倡导的系统建模语言 SysML 也来源于软件建模语言 UML。其推荐的主要方法论包括:IBM Telelogic 的 Harmony-SE,主要针对嵌入式系统综合设计和软件开发;OOSEM 面向对象的系统工程方法,来源于洛克希德-马丁公司的软件生产联盟,主要应用于洛克希德-马丁公司的大型分布式信息系统设计与开发;IBM 的 MDSD 方法论主要用于软件开

发的 RUP 规程,最佳实践应用于应对系统的规范、分析、设计和开发所面临的挑战;Vitech 的 MBSE 方法论强调以系统定义语言(SDL)来管理模型制品,需要一个经商定的、以架构或本体形式表达的信息模型,用于管理模型制品的句法和语义,作为需求分析人员、系统设计人员和开发人员的一种技术沟通途径,并为图形化视图生成程序、生成程序脚本和一致性检查程序提供一个结构;JPL 的状态分析(SA)方法论是一个基于模型和状态控制的架构,用于描述系统状态是如何演进的;Dori 的 OPM 方法论,结合了正规的但简单的可视化模型(OPD)与受限的自然语言语句(OPL),以便在一个综合的、单一的模型中表达系统的功能、结构和行为,OPL 是一种同时面向人和机器的双重目的语言^[6]。

最近几年,随着国外商业软件在中国的推广,MBSE 方法论受到广泛关注,并掀起了应用研究热潮。人们对于应用国外商业 MBSE 工具解决其面临的问题给予了很高的期望,近几年有大量相关论文发表,在知网上可以检索到的最近 3 年(2020—2023 年)的相关期刊论文有百篇以上,本文仅列出了一些比较有代表的论文^[7-16],其中大部分为基于国外商业 MBSE 工具的应用研究^[7-10]。以电子科技大学夏韬凌的论文为例,其主要是对现有商业 MBSE 工具的比较,并选取一种适合其研究对象的工具进行应用研究和实践^[8]。另一类是基于 INCOSE 的 MBSE 概念,提出了某领域 MBSE 设想或框架体系,以及需要解决的关键问题^[11-16]。本文属于后一种类型。

综上所述,INCOSE 提出的 MBSE 概念比较宽泛,涉及复杂系统的各个方面和全生命周期,但其倡导团队提出的主要方法论多数局限于系统的需求和设计描述。在具体实践方面多以软件密集型系统为主。在系统上下贯通方面主要论述了从需求分析、系统架构设计到系统功能逻辑描述方面的内容,其系统建模主要是指对系统架构进行建模,包括系统的组成、关系和运行逻辑,以及系统状态变化的描述。在系统性能仿真方面主要借助 Modelica 语言或与其他通用系统仿真工具打通的方式来实现。INCOSE 提出的 MBSE 概念具有前瞻性,在新的技术条件下,这一概念具有发展的价值和实现的可能,但其主要倡导成员提出的具体方法目前主要聚焦于系统架构设计信息

描述的范畴，Modelica 语言有其自身的局限性，不能覆盖所有的系统性能仿真。最初各大商业软件厂商推出的 MBSE 概念与 INCOSE 的定义范畴有较大差距，不能覆盖系统工程的全部内涵，目前也在逐步转向系统工程的全生命周期方向。

2 运载火箭 MBSE 设想

运载火箭是一个典型的复杂系统，其研制过程遵循系统工程方法。首先进行总体方案论证与设计；然后进行分系统功能、性能指标及结构的分解与分

配；再进行分系统论证、设计和验证，单机论证、设计和验证，机、电、软产品设计生产；最后进行产品集成形成完成的系统，并通过各种实物试验来验证系统性能是否达到设计要求。在这个过程中可能需要在某个层级或几个层级之间经过多轮次迭代，才能获得整体性能优、技术合理、经济性好的系统方案。传统上这种迭代主要是基于文档和会议协调开展，新型号的研制周期为 10 年左右。传统的研制流程如图 1 所示。

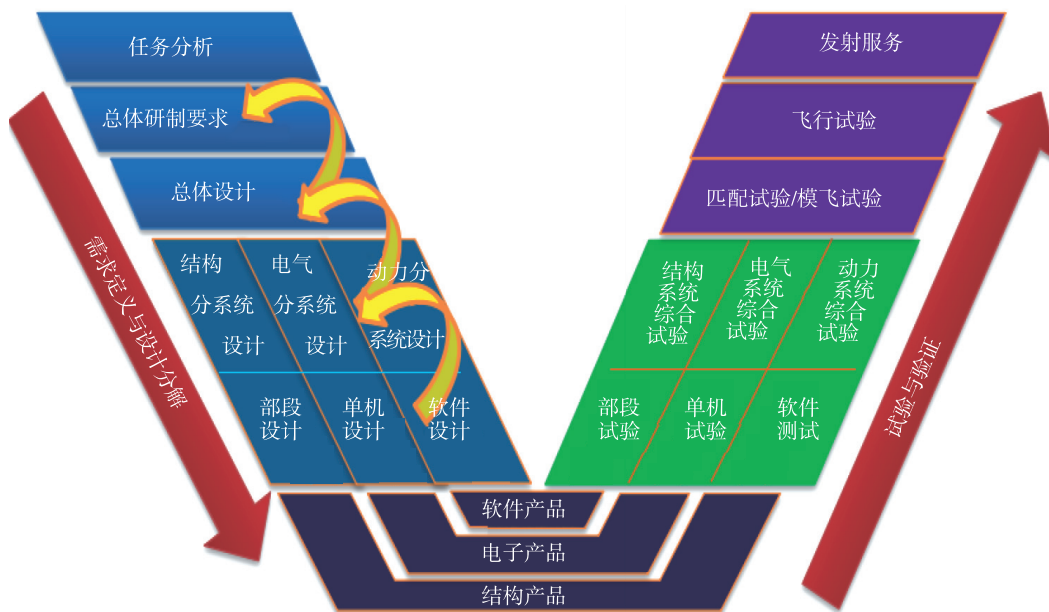


图 1 运载火箭传统系统工程流程

Fig. 1 Traditional work flow of systems engineering for launch vehicle

INCOSE 关于 MBSE 的定义，主要思想是在系统工程实践中引入模型，“以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动^[6-7]”，但其提出的具体方法对系统工程全过程覆盖不足，为弥补这一缺陷，需要将模型的范畴进行扩展。不仅包含系统需求信息数字化模型、架构数字化模型，还应包含系统产品三维数字化模型、性能预测仿真模型等。并且对这些建模方法进行正式的认证或确认，以支持各专业各参研单位高效高质量设计及基于模型的协同，从传统的基于文档的协同走向基于模型的协同，并充分利用信息化系统管理和传递数据，使设计协同从线下走向线上，以加快设计迭代。同时在研制早期通过跨专业跨单位的模型集成实现更精细化的联合仿真，为提前发现风险，实现更大范围、更深层次的设

计优化提供条件。将设计模型和仿真模型贯穿产品全生命周期，充分发挥模型的复用价值，构建数字孪生系统，促进传统生产模式向智能化生产模式转型，从完全依靠实物试验验证向虚实结合试验验证转型。最终为提升研制质量、加快研制进程、降低研制成本、提升研制效益提供助力。引入经认证或确认的建模方法后，运载火箭的 MBSE 设想如图 2 所示。

图 2 在原有系统工程流程中引入了基于模型的设计定义与要求下发、基于模型集成的虚拟试验、数字孪生系统构建与应用、基于模型的虚实结合试验、模型修正与评估以及数字主线，从而体现了新技术对传统系统工程方法的支持与改进。传统上是用设计文件来定义系统并下发任务书，在新技术条件下，可以采用数字化信息模型来定义

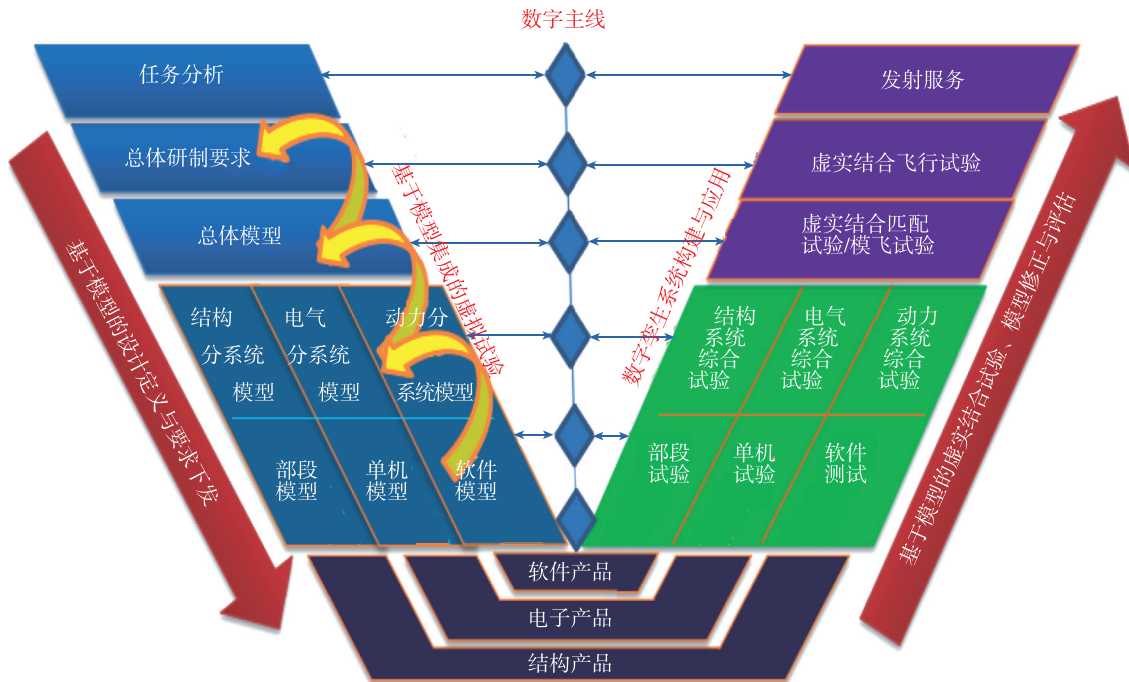


图 2 运载火箭的 MBSE 设想

Fig. 2 An image of model based systems engineering for launch vehicle

系统，这样便于计算机进行自动化处理，并可以实现上下游数字化信息的关联。对于复杂系统来说，这种关联将有助于发现可能引发“蝴蝶效应”的问题。将数字化信息模型与系统性能仿真模型结合，实现系统设计仿真一体化贯通，实现总体与分系统模型集成，从而可以实现更广泛、更深层次的设计优化，获得更优的系统设计方案。将动力学仿真模型与精细化的几何模型、有限元仿真代理模型联合，可实现基于多学科模型集成的虚拟试验，提前发现各层级设计不协调问题，在研制早期以最小的代价优化设计、防范风险。数字孪生系统的构建与应用将有助于利用已构建的精细化设计模型和仿真模型，促进生产过程的智能化，实现基于模型的虚实结合试验、模型修正与评估，在更多状态下实现对系统的行为和性能的验证与准确预测。数字主线将实现对系统模型和数据的统一管控，充分利用大数据管理技术和 AI 技术，实现对复杂系统技术状态变化的精细化管理和风险控制。

3 关键技术分析

实现运载火箭的基于模型的系统工程，涉及 6 大关键技术，分别是：设计信息统一化建模技术、异构仿真模型集成技术、数字孪生系统构建技术、虚实结合试验与评估技术、跨域异构信息系统集

成技术以及基础软硬件安全互联技术。

3.1 设计信息统一化建模技术

对设计信息模型尽最大可能实现统一化建模，设计信息可以分为两大类。一是设计要求和约束，二是方案描述和设计图纸。设计要求和约束包括但不限于系统性能要求、系统几何约束、质量约束、环境条件等。方案描述和图纸一般包括系统组成、结构尺寸、系统接口（包括机、电、软件接口）、系统运行逻辑、结构设计图、电气设计图和软件设计文档等。统一化建模技术已在结构三维设计、电气原理图设计、电缆网设计等方面取得突破，初步实现了工程数字样机的成功构建^[17]。基于 SysML 的系统架构统一化建模技术的研究与应用也已取得初步进展，并可支持实现软件设计从基于文档的设计向基于模型的设计转变，为构建更真实的体现产品实际运行过程的数字样机奠定基础。未来需要解决的问题是如何将这几种技术进行融合集成，在工程上能够更快速方便地构建出体现产品全部设计信息的完整数字样机，并增进其可读性和自动化处理能力。

3.2 异构仿真模型集成技术

系统性能建模与仿真是专业性很强的领域，不同的学科有不同的建模方法，不同的建模方法有其特定的优势，目前还不能够找到一种普适的

方法。异构性能仿真模型的集成是必须要解决的问题。目前主要的性能仿真模型可分为基于数学代数方程或常微分方程的性能仿真模型、基于有限元或有限体积法的性能仿真模型。针对不同的学科,其具体的数学方程表达形式有较大差别,并取决于各学科专家对本学科客观规律的认识程度,因而对同一问题可能产生很多种数学模型,并且适用情况也可能不同,因此对各类数学模型进行正式认证或确认是十分必要的,有利于把适合的方法用于适合的场景,也有利于仿真模型被正确地建立和使用,同时可以避免大量重复的复核复算工作,提高设计质量的同时也有利于提高工作效率。

运载火箭在实际飞行中是一个多物理场相互作用的过程,为了便于研究,人为地把不同现象划分为不同的学科进行研究,集成多学科异构模型进行仿真对了解和研究多物理场耦合作用对运载火箭实际飞行的影响是必要的。同时多学科异构模型的集成又是复杂的、不同形式的数学方程,求解的方法不同,运算效率也有较大的差异,采用多种方法构造有足够精度的代理模型进行集成仿真已被证明是可行之路。同时计算机软硬件技术的发展,也为集成和运算更复杂的仿真模型奠定了基础。

3.3 数字孪生系统构建技术

数字孪生技术是近几年研究比较火热的方向。数字孪生这个概念早在 2003 年就提出了^[18],直到近几年才得到广泛的重视,其重要原因在于 6 大技术的发展:精细化建模与仿真技术、高性能计算机软硬件技术、基于信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)的数据实时采集技术、虚实融合可视化技术、大数据管理技术和 AI 技术。这些技术的发展为数字孪生系统的构建奠定了基础。精细化建模与仿真包括了上面提到的设计信息统一化建模和性能仿真建模,是构建数字孪生系统的核心。高性能计算机软硬件技术是支撑精细化仿真模型运行的平台。CPS 是数字模型与真实物理世界关联的纽带。虚实融合可视化技术是数字模型与物理模型融合展示的手段。大数据管理技术是实现数字模型及其相关数据进行高效管理的基础。AI 技术有益于实现基于数据的预测与监控。数字孪生系统可以广泛地在产品生产、试验和发射服务阶段被构建,以支持设计模型的改进、优

化,对实物系统运行过程的预测与监控^[19]。

3.4 虚实结合试验与评估技术

完整数字样机的构建为开展更准确的虚实结合试验奠定了基础。在传统系统工程中,实物产品的性能大多依靠实物试验进行验证和评估。实物由于生产周期长,试验准备时间长,是复杂产品研发中最耗时的工作,也是研制成本的主要体现。更精细化的数字仿真模型可以使设计人员在研制初期进行更精细化的设计确认和优化,在研制后期可以结合实物试验,对数字仿真模型进行修正,从而获得更准确的仿真结果。通过实物试验和仿真试验的结合,更科学合理地对产品的性能进行评估。同时利用数字孪生系统,对实物试验过程进行实时监控,可以在不破坏产品的情况下达到最佳的试验效果,并可以增强产品的可复用性,从而进一步节约研制成本。实现虚实结合试验与评估的关键技术是基于数据对多领域模型进行实时修正和优化,以及基于神经网络、遗传算法、强化学习等生成结构、流体、多物理场等代理模型,实现与实物试验的实时融合^[20-22]。

3.5 跨域异构信息系统集成技术

运载火箭是巨复杂系统的典型代表,涉及的专业门类多,产品数量多,产品关联复杂,在研制过程中涉及的技术状态变化复杂,传统上都是依靠设计文件来定义产品的状态,文件之间的一致性依靠人工保证。随着信息系统开发技术和数据库技术的发展,建立贯通产品全生命周期的信息系统已成为可能。但由于复杂产品涉及参研单位多,各自的历史环境不同,全部使用同一个信息系统实践上可能存在较大的困难,需要解决跨域异构信息系统集成的问题。其关键是数据表达模式的统一,建立相应的标准规范是必由之路。除了业务层面的数据统一化表达标准,还包括系统底层的信息交换格式标准及系统通信接口标准等。

3.6 基础软硬件安全互联技术

数字主线以产品全生命周期数据管理(Product Life Management, PLM)平台为基础,形成产品信息集成主线,使所有与产品相关的数据高度集成、协调、共享。目前基于 PLM 的技术主要包括应用软件集成的面向对象的嵌入与连接技术、支持产品全生命周期数据建模与管理的对象建模

技术、数据集成、决策的数据仓储管理技术和成组技术等^[23]。PLM的底层是互联网技术,安全互联是必须要考虑的问题。安全互联技术是指对产品模型和数据的完整性、有效性和保密性进行安全防护、防篡改的技术。当前的研究主要包括对于模型和数据管理系统可能遭受的攻击进行预测并获得最优防御策略,基于区块链技术组织和确保模型和数据不可篡改、可追踪、可追溯等^[24-25]。

4 结束语

基于模型的系统工程的发展不仅会为传统的系统工程增彩添色,也将成为破解目前困境的一条有效途径。但也面临许多需要解决的问题与挑战,主要体现在以下6个方面。

1) 各专业建模工具的规范化和标准化,只有通过正式认证或确认的建模工具才能进入系统工程的研制程序,这需要开展大量的专业建模方法梳理、整理、分析和确认工作,甚至需要开发新的专业建模方法和工具。

2) 同类学科建模工具的统一化,这将有助于增强基于模型的设计协同,减少分歧,加快协调进度,提升设计质量。但由于复杂系统参研单位较多,对不同学科建模工具的统一极具挑战性。

3) 大规模的多学科模型集成技术难度大,协调难度更大。在传统模式下,往往采用模型简化的方式,以达到可以运算的程度,但也牺牲了很多细节,而这些细节中有可能存在决定成败的因素。在新模式下,虽然计算机计算能力已经比过去有了几十倍甚至上百倍的提升,为复杂大模型运行提供了更好的基础环境,但大规模多学科模型的集成和协调运行仍然是需要解决的问题。

4) 基于模型的系统工程新工具与新平台的研制。目前的商用软件只能覆盖本文设想模式的部分功能,并且商业公司技术体系的相对封闭性,也会给模型集成带来困难。发展自主可控的工具和平台是必须要走的一条道路,对人员和技术都是新的挑战。

5) 从传统的依托文件进行设计转向依托模型进行设计,对设计习惯也是巨大的挑战。需要学习用结构化信息模型来表达设计意图,就像从二维设计转向三维设计,过程会比较痛苦,先期工作量大。

6) 生产环节如何充分利用基于模型的设计结

果提升生产效率,需要有主动求变的精神。只有顺应模式的转型,才能最大限度地从转型中获得效益,而不是用增加更多的工作来保持原有的工作习惯,否则近期看似受益,实则损及长远。

基于模型的系统工程的发展与实践可以使设计更加规范,迭代更加快速,优化更加深入,协同更加便捷,试验更加全面,生产更加智能,产品更加好用,成本更加可控,将使得系统的研制更加高效,更快地研制出用户需求的产品。系统的利益相关方更容易参与到产品的研制中,理解产品的功能,发现产品研制和使用中的问题,从而降低复杂产品的研制风险和成本超预算风险。

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[J].上海理工大学学报,2011,33(6):520-525.
- [2] 栾恩杰.航天系统工程运行[M].北京:中国宇航出版社,2010.
- [3] 中国大百科全书编辑部.中国大百科全书·自动控制与系统工程卷[M].北京:中国大百科全书出版社,1992.
- [4] 李明华.航天型号总指挥的科学观与方法论[M].北京:北京大学出版社,2018.
- [5] NASA. NASA 系统工程手册[M].朱一凡,李群,杨峰,等,译.北京:电子工业出版社,2012.
- [6] Estefan J A. 基于模型的系统工程方法论综述[M].张新国,译.北京:机械工业出版社,2014.
- [7] 张柏楠,戚发轫,邢涛,等.基于模型的载人航天器研制方法研究与实践[J].航空学报,2020,41(7):78-86.
- [8] 夏韬凌.基于MBSE的民机航电状态监控系统设计[D].成都:电子科技大学,2021.
- [9] 吴颖,刘俊堂.MBSE 技术研究及其在飞机机电系统综合设计中的应用[C]//中国自动化学会系统仿真专业委员会,中国仿真学会仿真技术应用专业委员会,中国科学技术大学.第二届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集(20th CCSSTA 2019),2019:6.
- [10] 张磊,马振华,阎景波.MBSE 在车载发动机控制器需求开发中的应用[J].现代车用动力,2021(1):25-27,39.
- [11] 焦洪臣,雷勇,张宏宇,等.基于MBSE的航天器系统建模分析与设计研制方法探索[J].系统工程与电子技术,2021,43(9):2516-2525.
- [12] 李晓红,常家辉,徐可.MBSE 深化应用加速武器系统研制数字化转型[J].国防科技,2022,43(4):59-64.

- [13] 卢志昂, 刘霞, 毛寅轩, 等. 基于模型的系统工程方法在卫星总体设计中的应用实践[J]. 航天器工程, 2018, 27(3): 7-16.
- [14] 何巍, 胡久辉, 赵婷, 等. 基于模型的运载火箭总体设计方法初探[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1): 12-17, 32.
- [15] 王文跃, 侯俊杰, 毛寅轩, 等. 面向复杂产品研制的 MBSE 体系架构及其发展趋势研究[J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3073-3082.
- [16] 关锋, 葛平, 周国栋, 等. MBSE 发展趋势与中国探月工程并行协同论证[J]. 空间科学学报, 2022, 42(2): 183-190.
- [17] 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.
- [18] 王小军, 陈海东, 等. 运载火箭数字样机工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2017.
- [19] Grieves M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2): 71-84.
- [20] 聂蓉梅, 周潇雅, 肖进, 等. 数字孪生技术综述分析与展望[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1): 1-6.
- [21] 苏新瑞, 徐晓飞, 卫诗嘉, 等. 数字孪生技术关键应用及方法研究[J]. 中国仪器仪表, 2019(7): 47-53.
- [22] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [23] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.
- [24] 张振国, 吴笛. PDM 在制造业信息化中若干关键技术的应用研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(3): 119-123, 167.
- [25] Mandolla C, Petruzzelli A M, Percoco G, et al. Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: a case analysis of the aircraft industry[J]. Computers in Industry, 2019, 109: 134-152.

引用格式: 杨小龙, 聂蓉梅. 运载火箭基于模型的系统工程研究[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(1): 1-7.

Citation: Yang X L, Nie R M. Research on model based systems engineering for launch vehicle [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(1): 1-7.