



深空探测任务协同的系统工程方法应用及趋势

于国斌

Application and Trend of Model-Based Systems Engineering Methods for Deep Space Exploration Mission

YU Guobin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于学科链的卫星系统工程方法与实践

Satellite System Engineering Methods and Practices Based on the Subject Chain Method

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(1): 46-51

深空探测跳跃式再入返回任务设计

Mission Analysis and Design of Half-Ballistic Reentry for Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 269-275

我国深空探测任务电源系统发展需求

Research on Power System Development of Chinese Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(1): 35-40

空间核动力在深空探测中的应用及发展综述

An Overview of the Use and Development of Nuclear Power System in Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(5): 397-404

深空探测人工智能技术应用及发展建议

Suggestions on Artificial Intelligence Technology Application and Development in Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(4): 303-316,383

超远深空探测任务的能源动力方案

Ultra Deep Space Exploration Mission and Power Project

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(2): 213-220



关注微信公众号，获得更多资讯信息

深空探测任务协同的系统工程方法应用及趋势

于国斌^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191; 2. 国家国防科技工业局, 北京 100048)

摘要: 综述了基于模型的系统工程 (Model-Based Systems Engineering, MBSE) 的技术发展现状, 分析了深空探测系统工程与MBSE的问题及挑战, 提出构建数字化工程生态是新一代深空探测MBSE的发展方向, 归纳了面向深空探测任务协同的MBSE方法框架, 提出了支持深空探测任务协同的“4个闭环迭代”流程方法, 综合分析了支撑深空探测MBSE的系统模型体系与工具链平台。面向深空探测任务特点, 专门探讨了跨专业、跨层级、跨阶段、跨地域的协同设计与持续验证技术, 以及基于模型的安全性可靠性质量管理与技术状态控制技术, 最后总结展望了深空探测新一代基于模型的数字化系统工程的内容要点和关键趋势。

关键词: 深空探测; 航天系统工程; 基于模型的系统工程; 数字化工程生态

中图分类号: V4/V57

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)04-0407-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210036

引用格式: 于国斌. 深空探测任务协同的系统工程方法应用及趋势[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(4): 407-415.

Reference format: YU G B. Application and trend of Model-Based Systems Engineering methods for deep space exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 407-415.

引言

基于模型的系统工程 (Model-Based Systems Engineering, MBSE) 逐渐成为复杂工程系统创新研制的指导性方法技术体系, 经历了30年的持续发展。1990年, 系统工程国际委员会 (International Council on Systems Engineering, INCOSE) 成立, 致力于研究MBSE; 2007年, INCOSE发布“系统工程愿景2020”^[1], 给出了MBSE的完整定义, 发布了SysML 1.0版本, MBSE开始进入国际工业界视野; 2014年, INCOSE发布“系统工程愿景2025”^[2], MBSE开始在国内外引起工业界广泛关注, 纷纷进行实践探索, 普遍认为MBSE是新世纪装备产品研制的创新性方法论和技术体系; 2018年, 美国国防部发布“数字工程战略”^[3], 将MBSE推进到了数字化工程生态的新阶段。

鉴于MBSE对于复杂装备研制的有效性, 国内外纷纷开展研究探索与实践应用。国外方面, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 开发了MBSE的工程基础构架, 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 在虚拟航天器工程中使用了MBSE, 美国国防部先进研

究项目局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 在自适应车辆试验项目AVM中使用系统级设计与仿真技术实现“构造即正确”。洛克希德·马丁 (Lockheed-Martin) 公司^[4]、喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) ^[5-6]、波音 (Boeing) 公司^[7-8]等国外大型机构也在系统研发中开始使用MBSE技术。国内MBSE研究实践起步相对较晚, 从2013年开始航空、航天先后开始MBSE探索和实践^[9], 在MBSE概念普及、需求工程与系统设计、模型体系定义、大系统建模仿真^[10]等方面取得显著成果, 并且对于MBSE的应用研究从系统发展到分系统, 如航天控制系统、飞机航电系统、飞控系统^[11-15]。

MBSE以架构为中心, 以需求为出发点, 以设计和验证的对偶贯穿研制全流程。目前需求建模和架构设计普遍采用系统建模语言SysML作为统一表达, 验证则以基于模型的仿真为主, Modelica是系统仿真验证的事实规范。SysML是基于软件领域统一建模语言 (Unified Modeling Language, UML) 面向系统工程领域的扩充, 是面向系统需求与架构设计的建模语言^[16]。Modelica规范是源于欧洲的多领域物理统一建模规范, 1997年9月发布了第1版, 它综合多种建模语言优

收稿日期: 2021-05-26 修回日期: 2021-06-27

基金项目: 国家重点研发计划 (SQ2019YFE20137); 国防基础科研计划 (JCKY2020903B001); 民用航天技术预研项目

点,从原理上统一了之前的各种多领域建模机制。Modelica的诞生,为产品系统不同领域的行为、功能及性能的统一表述以及领域互联提供了标准,能够有效地支持系统级建模、仿真、分析、优化以及软件自动生成^[17-18]。

与以往航天任务相比,深空探测在系统规模、技术难度、可靠性安全性要求、研制周期与成本要求等方面都对航天系统的研制能力提出了更高的要求。传统的以文档为核心的系统工程方法已经无法有效满足研制需求^[19]。传统的以文档为核心的系统工程方法存在的问题主要体现在:众多信息分散于各个文档,难以保证完整性和一致性;对复杂的、动态交互性强的活动难以描述,表达力不足,有时会产生歧义;技术状态控制困难,工作量大,维护困难;缺少早期验证手段,主要依靠后期的实物验证,代价大,周期长。

中国航天系统发展正从试验应用型向业务服务型迈进。深空探测任务具有多领域耦合更强、技术难度更大、任务周期更长、运营维护更难、协调挑战更大的特点。这一形势对航天研制方法、研制手段、研制流程提出了新的要求。另一方面,数字化、网络化、智能化已经从2015年提出的技术方向发展为实践落地的手段,以数字化、网络化和智能化为特征的信息技术革命新阶段已经来临。本文旨在面向航天深空探测任务型号研制需求,以MBSE为方法手段,从宏观上探讨航天系统工程的方法与趋势,共同推进航天技术新发展。

1 面向深空探测的航天MBSE研制模式分析

1.1 深空探测航天系统工程现状与问题

中国航天工程经过几十年的发展,已建立了完整独立的工业体系,取得了大量理论突破与实践成果。载人航天、月球工程等重大航天工程的实施取得了举世瞩目的成就,中国航天工程已经具有完整的理论体系与知识产权积累。深空探测作为中国航天工程新兴方向,充分采用了仿真分析等数字化手段,形成了数字化设计与制造的产业基础和质量管控体系。但在新一代工业革命的背景下,以深空探测为代表的航天工程目前仍存在以下问题:

1) 专业仿真验证较多,多学科集成综合仿真、系统级仿真验证及优化较少,仿真验证的系统性不强;

2) 试验和运行数据的利用程度不高,没有充分利用数据修正仿真模型,模型重用性不强,知识积累较为薄弱;

3) 系统设计、验证、制造与集成测试各环节分别开展了数字化工作,但环节间缺乏基于模型的端到端集成;

4) 研制过程可追溯性差,设计更改需要很大精力进行影响分析,影响域分析手段不足,更改分析不彻底,带来的问题较多;

5) 现场的产品实际加工和测试信息不能及时反馈综合到系统设计,往往到产品实物集成、甚至飞行试验时才能暴露问题,质量和效率不高。

综合以上分析,有必要在调研国内外基于模型的系统工程研究成果以及航天系统工程应用经验的基础上,总结中国深空探测领域的研制流程与方法,探索面向实际需求的基于模型的深空探测MBSE研制模式。

1.2 深空探测航天MBSE现状与问题

1) MBSE研制模式尚处于起步阶段,尚未形成统一模式

国内以深空探测为代表的航天系统仅在部分新型号中开展了基于统一模型的三维几何数字样机的设计和结构分析以及数字功能样机系统仿真验证,在此基础上突破了基于三维几何数字样机的产品数据管理、强度结构分析、数字模装验证、流程仿真验证、虚拟现实体验以及基于系统功能样机的多专业统一仿真验证、数字伴飞等一系列数字化设计制造运维技术。面向产品全生命周期的性能样机、制造样机、维修保障样机等工作基本处于起步阶段,基于模型的设计制造未能完全实现,大部分型号研制仍处于基于文档的协同研制阶段,导入的图纸仍是二维电子图纸和纸质图纸,还没有形成贯穿产品设计到工艺设计、生产制造、试验验证、综合保障的全生命周期基于统一模型的系统工程研制模式。

2) 基于模型的设计仿真手段缺乏,任务全周期技术状态管理能力不足

面向未来MBSE研制模式转变,结合深空探测航天领域型号研制需求,需要进一步加强系统顶层设计与多学科协同验证工具手段建设,提升全系统的基于模型的设计仿真能力;面向航天领域复杂、多状态的技术状态管理,现有产品数据管理系统功能需要进一步升级,前端延伸到需求分析、规划论证和仿真验证管理,后端延伸到在轨数据、科学数据的管理,构建任务全周期技术状态管理能力,进一步提升知识管理、知识重用和大数据分析能力。

3) 型号应用方面存在较大差距,基于模型的设计仿真尚未全面进入流程

虽然“十二五”至今已打下了很好的硬件基础,但

在型号应用方面还存在较大不足。一是在业务推动方面，各业务领域对推进数字化的主动性不一，在部分项目建设中，仍然存在信息化条线为主体、业务部门配合的情况，容易出现业务部门与数字化脱离的“两张皮”现象，造成部分系统落地效果不佳。二是在一体化意识方面，跨单位的模型和数据的共享推进存在困难，单位间存在利益冲突，往往会以知识产权保护等为由在周期和质量上打折扣，造成模型和数据无法有效及时共享。

4) MBSE软件对外依赖大，自主软件少而不强

CAD、CAE、PLM、ERP、数据库、操作系统基本采用进口，且主要集中在美国、德国和法国。国内主要工业软件基础薄弱，短期不具备全面替代性。目前受限于国内工业软件基础薄弱、成熟度不高、通用性不足，且工业软件在研发过程中与应用单位结合不够。进口软件存在禁运风险，且软件产品线不确定性强。受国际政治形势和贸易环境的影响，西方国家加大对中国的封锁和管制，面临禁售、禁运而停产的风险。受国外大型软件公司发展战略调整的影响，进口软件的采购、应用、二次开发和维护升级等工作都存在较大的不确定性和制约。

1.3 深空探测任务特点与需求

深空探测是国际科学与技术前沿领域，具有多学科交叉、多部门协同的特点，是当今最困难的空间探测任务之一。截至2020年12月，人类共实施了246次深空探测活动，其中成功143次，成功率约为58.9%。“嫦娥五号”任务的圆满成功与“天问一号”火星探测器成功着陆，推动中国深空探测进入新的发展阶段。

中国深空探测任务在新时代面临全新的挑战：

①从地月空间迈向行星际空间，探测对象多样化，探测任务规模化，探测环境复杂多变；②从技术实现逐渐转向科学牵引，任务目标更加多元，探测模式更加复杂，实施保障要求更高；③从独立自主走向自立自强、开放合作，国际合作的范围更广、层次更深^[20]；④从人机探测独立发展向人机联合探测，对风险管理和知识重用要求更高。这些挑战对于数字化系统工程提出了全新的要求，迫切需要面向深空探测任务探索新一代基于模型的数字化系统工程方法技术体系。

2 深空探测任务协同的系统工程方法与框架

2.1 深空探测数字化工程生态

深空探测任务的复杂性、多元性、协同性、自主性等特性决定了其数字化系统工程是一个工程生态。

深空探测数字化工程生态是面向型号任务全流程，由系统模型和数据驱动，以数字化工具链平台为支撑，为实现全系统数字化设计、数字化验证、数字化交付及全流程数字化流转而形成的深空探测数字化工程生态圈。数字化工程生态的关键是产品数字化和过程数字化^[9]。产品数字化是指从工程总体、系统总体、分系统总体到单机，自上而下提出数字化模型要求，自下而上交付装备产品的同时交付对应的数字化模型；过程数字化是指数字工程贯穿概念论证、系统设计、工程实现、产品制造、测试试验、运行维护等产品全生命周期，并且实现不同阶段之间数字模型的贯通与流转。

具体地，数字化工程生态包括流程与标准、模型与数据、工具链、人才队伍4个要素。流程与标准遵循深空探测研制流程，包括方案论证、系统设计、集成测试、运行维护等阶段的基础规范、模型规范、接口规范、应用规范等。模型体系包括需求模型、系统模型、工程模型、产品模型、制造模型、孪生模型等全流程模型^[10]，数据包括需求数据、设计数据、仿真数据、试验数据、遥测数据等。工具链体系包括协同管理类工具、系统设计类工具、仿真分析类工具、试验优化类工具、健康管理类工具、集成接口类工具等。人才队伍包括从工程总体到单机的上下游产业链内的型号研制人员与数字化规划实施人员，以及提供规范、模型、工具支撑的供应商与科研院所。

进一步地，本文针对深空探测流程提出了新一代航天系统工程“4个闭环迭代”方法论，给出了适应深空探测对象环境多样多变的MBSE模型体系以及工具链支撑平台要求；针对深空探测自立自强、开放合作需求，探讨了基于Modelica的深空探测协同设计与持续验证技术；针对实施保障、风险管理要求，讨论了深空探测基于MBSE的质量控制体系。

2.2 深空探测任务数字化系统工程方法

结合深空探测系统的研制流程，实现其系统工程的核心是落实4个闭环：总体小闭环验证、系统大闭环集成、数字实物虚实闭环映射以及数字主线闭环管理，如图1所示。在设计阶段基于数字化系统模型通过总体小闭环和系统大闭环两个层次设计-验证的数字化迭代，实现“设计即正确”；在测试验证阶段和运行维护阶段，建立数字孪生系统模型，通过数字实物虚实闭环实现数字化模型精准校验以及数字化测试与运维；在研制全流程通过数字主线实现闭环管理。

1) 总体小闭环验证

根据系统需求，调用系统架构模板或者重新设计，构建系统架构模型；基于系统架构模型快速形成

系统总体框架；基于系统架构模型实现系统指标分解与分系统指标定义；基于系统架构模型完成分系统功能要求定义；基于系统架构模型完成分系统接口要求定义；基于分系统指标、功能、接口定义构建系统模型；基于系统模型完成分系统指标、功能、接口的匹配性验证，实现总体小回路验证。

2) 系统大闭环集成

根据单机需求，调用单机模板或者重新设计，构建单机综合模型；基于单机综合模型，完成单机内部机、电、液、控、热各特性指标的分解与定义；基于单机综合模型，完成单机内部机、电、液、控、热各特性指标的匹配性验证；将细化的单机模型迭代更新到分系统模型，实现分系统小回路详细验证；将细化的单机模型与分系统模型迭代更新到系统模型，实现

系统总体大回路验证。

3) 数字实物虚实闭环

通过在系统设计阶段、测试验证阶段和运行维护阶段建立航天器多领域、多层次的全系统数字化模型和综合性数字样机，实现不同研制阶段航天器数字化系统模型或数字化样机与航天器实物的映射关联，支持航天器模型验证、虚拟试验、故障分析、数字伴飞、故障预测、飞行预案等应用场景。

4) 数字主线闭环管理

基于模型，实现任务分析、方案论证、系统设计、集成测试、运行维护阶段的模型关联和工具接口打通，从而实现全流程一致化设计、仿真、测试及运维，在此基础上实现产品型号全流程闭环管理。

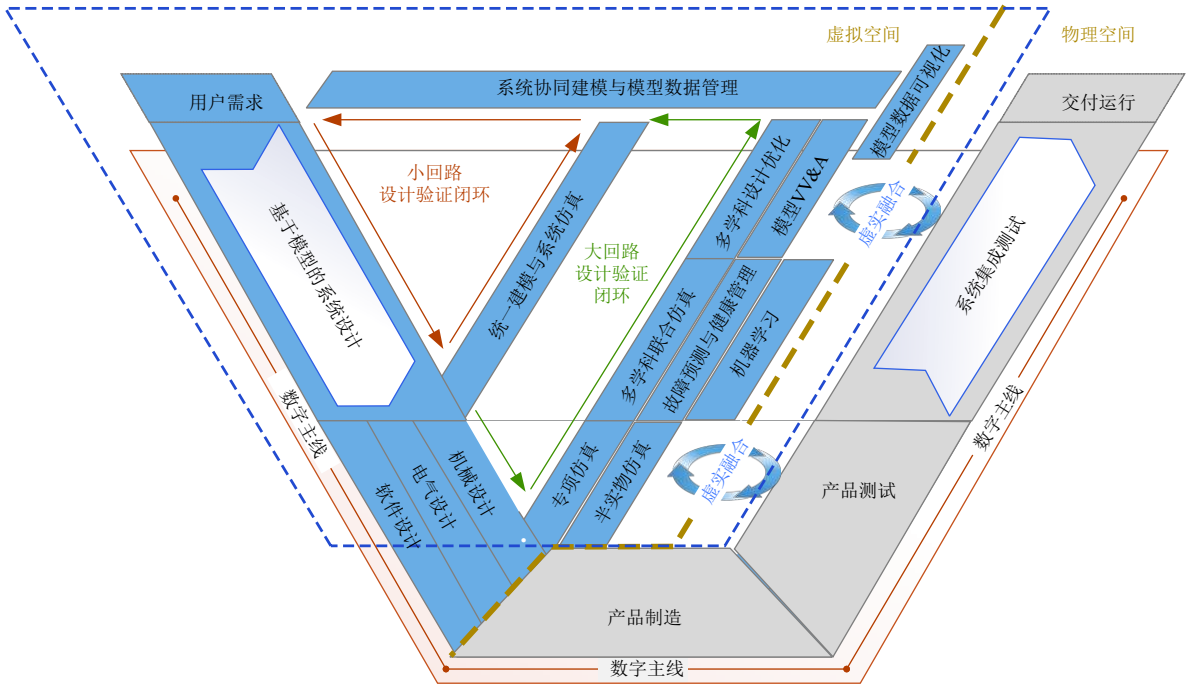


图1 深空探测系统工程4个闭环
Fig. 1 “Four closed loop iteration” process of deep space exploration MBSE

2.3 深空探测MBSE系统模型体系与模型库

全生命周期模型体系与模型库是实现深空探测MBSE的关键。从MBSE标准流程来讲，模型体系包括需求模型、功能模型、逻辑模型及物理模型，从探测任务全生命周期模型体系来讲，其模型体系包括需求模型、系统模型、工程模型、产品模型、制造模型、孪生模型等全流程模型，各模型具体涵义请参见文献[9]，这两者是可以对应的。模型体系可以进一步从3个维度进行划分，从生命周期阶段维度，包括方案论证、系统设计、生产制造、测试验证、运行维护等阶

段模型；从专业维度，包括姿轨控、能源、推进、环热控、信息等专业模型；从层次维度，包括系统、子系统、单机、元器件等层次模型。

在深空探测模型体系中，多专业统一的系统模型占据枢纽地位，是装备数字化的核心模型，也是数字化交付的关键内容，用于航天器的功能和逻辑设计以及多层次、多专业集成仿真验证，主要采用多专业统一物理建模语言Modelica构建和管理。系统模型从内容上覆盖功能模型与逻辑模型，支持专业维度统一模型集成，可以将姿轨控专业模型、能源专业模型、推

进专业模型、环热控专业模型、信息专业模型集成为多专业统一的系统模型；也支持层次维度数字化交付组装集成，可以由元器件模型组装为单机模型，由单机模型组装为子系统模型，由子系统模型组装为系统模型，最终形成多层次多专业系统模型。系统模型在流程上可以支持方案论证、系统设计、测试验证、运行维护等阶段的集成仿真验证。

需求模型、系统模型、工程模型、产品模型、制造模型、孪生模型等全流程模型可以相互转换，不同类型模型之间的转换已经被越来越多的方法和工具所支持，例如SysML、Modelica到Simulink、STK、VHDL、SystemC以及SysML与Modelica之间的转换^[21-26]。通过这些转换工具，可以把系统模型作为一个模型中心，并从系统模型直接生成特定领域模型，支持全流程模型贯通与流转。

2.4 深空探测MBSE系统工具链平台

MBSE工具链根据研制流程和应用场景可以分为研发设计类、生产控制类、经营管理类以及系统运行嵌入式类。研发设计类软件具体包括CAD/CAPP/CAM、CAE（结构/热/电磁/流体/多物理场等场分析软件）、专业设计仿真软件（EDA/机械/控制/液压等专业软件）、系统设计仿真软件（需求/系统设计/系统仿真等软件）以及优化设计、协同集成等软件，PLM/PDM/SDM/TDM等软件主要用于研发管理，有时也被归入研发设计类软件。

在研发设计类软件中，CAD（二维和三维结构设计）、CAE（有限元场分析仿真）、专业设计仿真、

系统设计仿真及优化软件是产品研发的主要工具软件，可以称之为设计仿真类软件。设计仿真类软件是航天产品创新的支撑和航天产品研制的保障，也是航天系统工程中的核心，其研制要求高、难度大、周期长。典型的航天MBSE工具链如图2所示。

设计仿真类软件中，从国际上技术发展来看，CAD、CAE、专业设计仿真已经比较成熟，MBSE的关键在于系统级设计与仿真技术与软件。系统级设计与仿真也是装备产品全数字化设计的核心技术，欧美近10年正在争相布局并形成新一代数字化工业软件，美国IBM公司、法国达索（Abaqus）公司、德国西门子（Siemens）公司纷纷提出支持MBSE的软件平台^[27-30]。但一味的模仿替代无法真正形成自主的先进工业软件，把握工业软件国际发展趋势、立足中国工业创新需求、面向工程迭代创新才能形成中国工业软件。系统级设计与仿真技术就是这样一次历史机遇，是数字化技术革命的制高点。系统级设计仿真技术与软件的突破，不仅可以掌握MBSE的枢纽、占据数字化技术革命的制高点，而且可以向下辐射替代一系列专业仿真软件，与行业融合形成自主行业软件，这是中国工业软件与航天行业数字化支撑软件后来居上的历史机遇。

深空探测作为国际科学技术前沿领域与航天发展新兴方向，有条件提供中国新一代工业软件发展土壤，有责任推动新兴数字化工业软件发展。深空探测MBSE工具链需要在MBSE通用平台基础上，针对国际开放合作提供协同设计与持续验证工具，针对风险控制与质量管理提供安全性可靠性质量设计与技术状态控制工具。

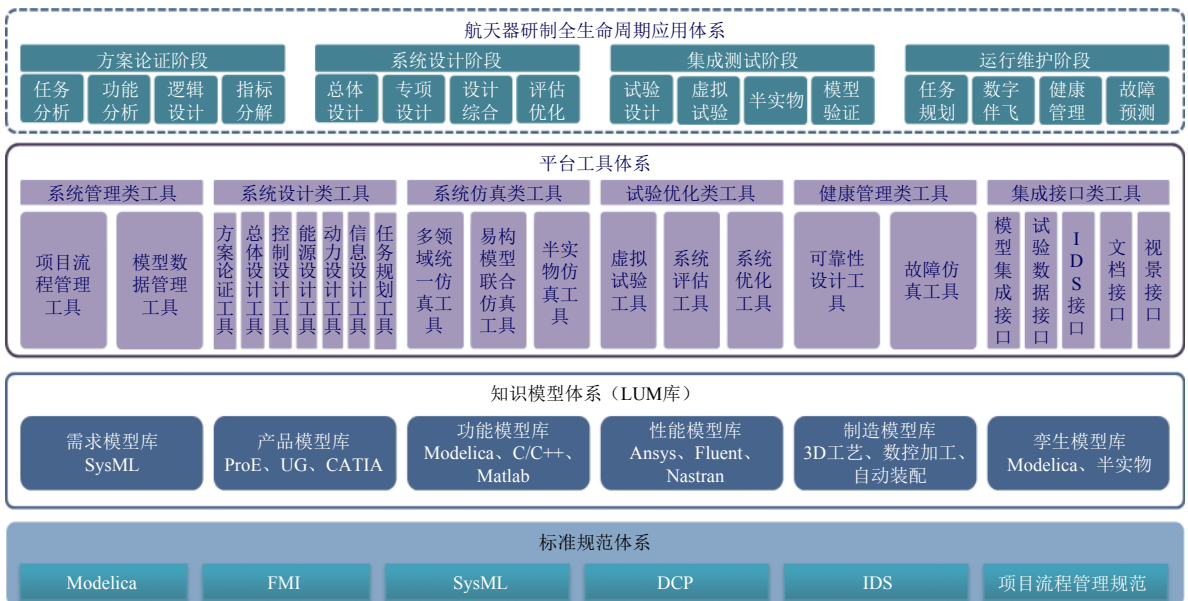


图 2 深空探测MBSE工具体系

Fig. 2 Tool chain of deep space exploration MBSE

2.5 基于Modelica的深空探测协同设计与持续验证

深空探测任务具有系统复杂、耗时长、协作单位多的特点,任务全程涉及多专业、多层次、多阶段、多地域协作。深空探测任务MBSE数字化的核心在于实现跨专业、跨层级、跨阶段、跨地域的协同设计与持续验证。

目前系统建模标记语言SysML提供了系统需求建模与系统架构设计标准规范,为协同设计奠定了规范基础^[2]。基于Modelica的系统建模仿真技术归纳统一机、电、液、控、热等各单学科原理的工程物理系统统一原理,使得不同学科可以采用统一的数学表达、统一的模型描述、统一的建模模式来实现统一物理建模与仿真验证。在数学上,Modelica统一为连续-离散混合、微分-代数耦合系统建立数学方程系统;模型表达上,Modelica通过广义基尔霍夫定律和面向组件建模实现多学科统一建模。进一步通过Modelica统一的编译映射机制和符号归约分析可以实现知识模型的统一仿真求解,生成仿真C代码,形成可执行的模型。两者结合即实现了“画出拓扑、即刻仿真”,即画出系统的拓扑原理图,即刻自动生成程序进行动态仿真。Modelica^[18]据此成为工业互联网时代工业知识统一表达和工业模型互联的标准,为跨专业与跨层级的系统级仿真验证奠定了基础,从而实现MBSE的模型统一表达与工业互联以及跨专业与跨层级的系统级仿真。

1) 跨专业与跨层级系统设计及仿真验证

包括基于多领域统一建模语言解决控制专业、能源专业、环热控专业、信息专业的设计与仿真验证;基于多层次建模解决工程总体、系统总体、专业总体、分系统、设备、组件的集成设计验证。

2) 跨流程全生命周期持续验证

包括基于需求模型支撑方案论证阶段的任务分析、功能分析、逻辑设计、指标分解;基于功能模型与几何模型支撑系统设计阶段的总体设计验证、专项设计验证、设计综合验证、方案评估优化;基于性能模型支撑详细设计阶段的结构/电气/动力/控制等性能分析;基于制造模型支撑生产制造阶段的3D工艺、数控加工、自动装配验证;基于孪生模型支撑集成测试阶段的试验设计、虚拟试验、半物理试验、模型验证;基于孪生模型支撑维护维护阶段的数字伴飞、任务规划、健康管理、故障预测。

3) 跨地域协同设计与仿真

通过基于网络的模型协同管理实现跨地域设计与建模,并提供版本管理、角色管理、权限控制;通过分布式仿真实现跨地域协同仿真,并基于模型的自动划分或者手工划分方式,提升复杂大规划系统模型的

仿真效率。

2.6 深空探测MBSE质量设计控制体系

1) 基于模型的六性设计验证分析

深空探测六性设计验证分析包括系统可靠性设计与仿真验证、系统维修性设计与仿真验证、系统保障性设计与仿真验证、系统安全性设计与仿真验证、系统经济性验证分析以及系统环境适应性验证分析。通过对深空探测六性的设计与仿真验证,全面分析验证六性指标设计的合理性,辅助提高型号六性指标,可以减少故障发生次数,缩短设备维修和故障恢复时间,减少维修备件以及保障设备需求,降低维修人力和维修技能需求,保持良好的系统可靠性,从而提高任务执行能力,降低使用保障费用。

2) 基于模型的安全性可靠性质量设计

基于模型的安全性可靠性分析是近几年研究热点^[31]。基于模型开展可靠性仿真分析,对各种可能的风险进行评价、分析,以消除风险或将风险减小到可接受的水平,辅助提高系统的安全性和可靠性。一个典型的可靠性仿真分析包括以下内容:①快速构建故障模型:基于正常的功能模型通过交互方式能够快速自动化演变为对应的故障模型,提高故障模型开发效率;②故障模式管理:对于系统型号中遇到的单点失效模式进行统一集中量化管理,保证数据源一致性,有利于不同设计师对故障模式的维护与调用;③量化故障后果:通过故障模式注入、故障模拟、故障传递,实现单点失效模式对于其它设备、子系统、系统的整体影响,评估单点失效模式的严重程度与影响范围,可指导系统可靠性设计;④可靠性验证:通过故障仿真,对系统典型故障工况的现象进行仿真与验证,对未知的故障工况进行模拟与探索。

3) 基于模型的技术状态控制

随着MBSE应用的不断深入,模型逐渐取代文档成为系统技术状态的核心载体,传统以文档为中心的技术状态管理模式难以适应,针对MBSE体系下系统技术状态管理需求,实现系统仿真模型数据谱系化存储、系统仿真模型数据细粒度版本管理、系统仿真模型数据结构化比较、基于Web的系统仿真模型数据可视化,实现对深空探测产品全生命周期过程中系统仿真模型生成、更改、传递、保存等一系列活动的管理与控制,确保系统仿真模型数据的有效性、准确性、一致性、完整性和可追溯性。

3 结束语

深空探测作为国际科学技术前沿领域与航天发展新方向,在新时代面临全新的挑战,任务与环境的

复杂多变、任务目标与模式的多元化、任务形式的国际开放合作以及任务智能化与可靠性的要求,迫切需要面向深空探测任务研究探索新一代基于模型的数字化系统工程方法技术体系。本文在国内外MBSE技术发展综述基础上,分析了目前深空探测系统工程与MBSE的现状问题及发展的挑战与需求,指出构建数字化工程生态是新一代深空探测MBSE的发展方向,从深空探测MBSE流程方法、模型库体系、平台工具链以及上下游人才队伍4个要素对深空探测数字化工程生态进行了分析。提出了由总体小闭环验证、系统大闭环集成、数字实物虚实闭环映射、数字主线闭环管理的“4个闭环迭代”流程方法,综合了由需求模型、系统模型、工程模型、产品模型、制造模型、孪生模型组成的系统模型体系,归纳了专业设计仿真与系统设计仿真两级工具链组成的支撑平台软件。

数字化是新兴的技术变革,深空探测是航天新兴的发展方向,MBSE是数字化的有效方法,我们需要构建新一代完全自主的深空探测数字化工程生态,支撑中国深空探测任务的发展,实现深空探测任务的数字化研发。通过深空探测、数字化及MBSE的结合,可以围绕以下重点趋势方向,实现航天新兴型号与数字化新兴技术的融合发展:

1) 自主、开放的工具链平台是深空探测MBSE的支点

以系统级设计与仿真工业软件的创新发展为契机,以深空探测任务型号的数字化为土壤,建设发展自主可控、先进开放的深空探测数字化系统设计 with 仿真验证平台。

2) 跨专业、跨层级、跨阶段、跨地域协同设计与持续验证是深空探测MBSE的核心

深空探测任务覆盖制导、导航与控制(Guidance, Navigation and Control, GNC)、能源、推进、环热、信息等多个专业,跨越工程总体、系统总体、分系统、单机等多个层级,涵盖论证、设计、制造、测试、运维等多个阶段,支持不同地域单位乃至不同国家分工协作,系统协同设计与持续仿真验证是数字化核心。

3) 多专业统一的系统模型体系与模型库建设是深空探测MBSE的关键

深空探测模型是覆盖需求、设计、仿真、制造、运维的模型体系,其中基于统一规范、多专业统一的系统模型是关键,系统模型支持与其它不同类型模型的转换与集成。基于统一建模规范构建覆盖不同专业、不同层次、不同阶段且经过标定确认的深空探测

型号模型库,是实现深空探测数字化的基础与关键。

4) 基于模型的安全性可靠性质量管理与技术状态控制是深空探测MBSE的抓手

MBSE与数字化为传统的六性分析与技术状态控制管理提供了全新的方式与手段,基于模型和仿真实现安全性可靠性质量管理与技术状态控制是深空探测MBSE最重要、最易出成效的抓手。

参 考 文 献

- [1] CRISP H E. INCOSE Systems engineering vision 2020 [EB/OL]. [2021-06-27]. https://www.sebokwiki.org/wiki/INCOSE_Systems_Engineering_Vision_2020.2013.
- [2] CRISP H E. INCOSE Systems engineering vision 2025 [EB/OL]. [2021-06-27]. <https://www.incose.org/products-and-publications/se-vision-2025>.
- [3] ZIMMERMAN P. DoD digital engineering strategy[C]//Proceedings of the 20th Annual National Defense Industrial Association (NDIA) Systems Engineering Conference. Springfield, VA: [s. n.], 2018.
- [4] OSTER C. The lock-heed martin digital tapestry[C]//INCOSE MBSE workshop. Jacksonville, FL, USA: INCOSE, 2012.
- [5] NICHOLS D, LIN C. Integrated model-centric engineering: the application of mbse at jpl through the life cycle[C]//INCOSE International Workshop MBSE Workshop .Los Angeles, USA: INCOSE, 2014.
- [6] BINDSCHADLER D L, VALERIO C P, SMITH R R, et al. A structured, model-based systems engineering methodology for operations system design[C]// International Conference on Space Operations. Daejeon, Korea: AIAA, 2016.
- [7] SHEELEY B, MALONE R, PALMER J, et al. MBSE implementation across diverse do-mains at the Boeing company[C]//INCOSE International Workshop MBSE Workshop .Los Angeles, USA: INCOSE, 2014.
- [8] SEAL D. The Model-Based Engineering(MBE)diamond —a framework for digital transformation[C]//INCOSE International Workshop MBSE Workshop. Los Angeles, USA: INCOSE, 2020.
- [9] 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.
- [9] HAN F Y, LIN Y M, FAN H T. Research and practice of model-based systems engineering in spacecraft development[J]. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(3): 119-125.
- [10] 张柏楠, 戚发劼, 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): 72-80.
- [10] ZHANG B N, QI F R, XING T, et al. Model based development method of manned spacecraft: Research and practice[J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2020, 41(7): 72-80.
- [11] 王黎明. 控制系统基于模型的系统工程开发方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [12] 葛立敏, 刘远恒, 王扬. 基于模型的系统工程在航电系统设计中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2015, 477(8): 60-63.
- [12] GUO L, LIU Y, WANG Y. Study on application of model-based system engineering in avionics system design[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 477(8): 60-63.

- [13] 白洁,吕伟,张磊,等.基于模型的系统工程在机载电子系统领域的应用[J].航空制造技术,2015(4):96-99.
BAI J, LV W, ZHANG L et al. Application of model-based system engineering in area of airborne avionics system[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(4): 96-99.
- [14] 尧伟文,曹云峰,庄丽葵.一种基于模型开发飞控系统的方法[J].计算机与数字工程,2017,45(2):351-354.
YAO W, CAO Y, ZHUANG L. A model-based method for developing flight control system[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2017, 45(2): 351-354.
- [15] ZHANG Z, CAO Y, MENG D, et al. Candidate regions extraction of intruder airplane under complex background for vision-based sense and avoid system[J]. *Iet Science Measurement & Technology*, 2017, 11(5): 571-580.
- [16] 袁琳,刘玉生.基于SysML的概念设计功能建模方法[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):164-177.
YUAN L, LIU Y S. SysML-based function modeling method for conceptual design[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2018, 24(1): 164-177.
- [17] FRITZSON P. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: a cyber-physical approach[M]. New York: John Wiley & Sons, 2014.
- [18] 周凡利.工程系统多领域统一模型编译映射与仿真求解研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
ZHOU F L. Research on compiling and solving of the unified multi-domain model for engineering systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [19] 周书华,曹悦,张政,等.基于SysML和Modelica的复杂机电产品系统设计与仿真集成[J].计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(4):728-738.
ZHOU S, CAO Y, ZHANG Z, et al. System design and simulation integration for complex mechatronic products based on sysml and modelica[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2018, 30(4): 728-738.
- [20] 裴照宇,刘继忠,王倩,等.月球探测进展与国际月球科研站[J].科学通报,2020,65(24):49-58.
PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Progress of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(24): 49-58.
- [21] FRIEDENTHAL S, MOORE A, STEINER R. A practical guide to SysML: the systems modeling language[M]. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 2014.
- [22] RAHMAN M A A, MIZUKAWA M. Model-based development and simulation for robotic systems with SysML, simulink and simescape profiles[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(2), DOI: 10.5772/55533.
- [23] SPANGELO S C, KASLOW D, DELP C, et al. Applying Model Based Systems Engineering(MBSE) to a standard CubeSat[C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2012: 1-20.
- [24] MISCHKALLA F, HE D, MUELLER W. Closing the gap between UML-based modeling, simulation and synthesis of combined HW/SW systems[C]// Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition(DATE). Dresden, Germany: [s. n.], 2010: 1201-1206.
- [25] JOHNSON T A, JOBE J M, PAREDIS C J, et al. Modeling continuous system dynamics in SysML[C]//ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Seattle, Washington, USA: [s. n.], 2007: 197-205.
- [26] PAREDIS C, BERNARD Y, BURKHART R M, et al. 5.5. 1 An overview of the SysML - modelica transformation specification[C]// INCOSE International Symposium. [S. l.]: INCOSE, 2010.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] MOHAMMAD C, AISTE A, AURELIJUS M, et al. Towards solving MBSE adoption challenges: the D3 mbse adoption toolbox[J]. *INCOSE International Symposium*, 2018, 28(1): 1463-1477.
- [31] 胡晓义,王如平,王鑫等.基于模型的复杂系统安全性和可靠性分析技术发展综述[J].航空学报,2020,41(6):140-151.
HU X Y, WANG R P, WANG X, et al. Recent development of safety and reliability analysis technology for model-based complex system[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2020, 41(6): 140-151.

作者简介:

于国斌(1971-),男,博士,国家国防科技工业局科技与质量司专家,主要研究方向:月球与深空探测工程总体设计、质量与可靠性、系统工程。

通讯地址:国家国防科技工业局(100048)

电话:(010)68379758

E-mail: 634277973@qq.com

Application and Trend of Model-Based Systems Engineering Methods for Deep Space Exploration Mission

YU Guobin^{1,2}

(1. School of Astronomers, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100091, China;

2. State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, PRC, Beijing 100048, China)

Abstract: This paper analyzes the present development of Model-Based Systems Engineering (MBSE), the problems and challenges of system engineering for deep space exploration and MBSE, and proposes that the digital engineering ecology is the development direction of the new generation of MBSE for deep space exploration mission. It summarizes the Model-Based System Engineering method framework for deep space exploration mission collaboration. The “four closed loop iteration” process method is proposed to support deep space exploration task collaboration, and the system model system and tool chain platform supporting deep space exploration MBSE are analyzed comprehensively. Based on the characteristics of deep space exploration mission, this paper discusses the collaborative design and continuous verification technology of cross specialty, cross level, cross phase and cross region, as well as the model-based safety and reliability quality management and technical state control technology. Finally, the content points and key trends of the new generation of model-based digital system engineering for deep space exploration are summarized and expected.

Keywords: deep space exploration; space system engineering; Model-Based Systems Engineering (MBSE); digital engineering ecology

Highlights:

- The digital engineering ecology is the development direction of the new generation of MBSE for deep space exploration missions.
- The model-based system engineering method framework for deep space exploration task collaboration is analyzed.
- The “four closed loop iteration” process method is proposed to support deep space exploration mission collaboration.
- The core of deep space exploration MBSE is collaborative design and continuous verification of cross specialty, cross level, cross phase and cross region.
- Model-based safety and reliability quality management and technical state control are the key points of MBSE for deep space exploration.

[责任编辑：宋宏，英文审校：宋利辉]