

载人月球探测航天器数字主线构建与应用

魏 平¹, 袁 蕊¹, 吴紫薇¹, 范松涛¹, 魏政哲², 王开来²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 上海安托信息技术有限公司, 上海 201101)

摘 要: 面对传统航天器研制模式中研制信息传递不到位、工作迭代多的问题, 载人月球探测航天器使用基于模型的系统工程(MBSE)方法, 通过对模型体系及虚实数据的整合, 提出了可扩展、可配置的工程级数字主线。基于载人航天器元模型模板构建数据综合视图, 形成完整的复杂航天器全局唯一真相源, 体现了权威数据、信息和知识在工程研制信息和数据系统中的相互关系及作用, 从而为研制人员提供访问、集成和将不同数据转换为可操作信息的能力。数字主线贯穿总体、机械、电子多个专业领域, 已初步应用于航天器研制需求分析、系统设计、产品设计3个阶段, 后续将拓展至制造、测试、运维全过程。其能够以跨越传统的孤立功能视角来管理和追溯航天器整个生命周期过程, 在维护研发信息一致性、模型自动传递和转化、研制流程优化、全局影响分析等方面都展现出巨大优势。

关键词: 载人月球探测; 航天器数字主线; 基于模型的系统工程(MBSE); 数字化; 全生命周期

中图分类号: V57 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2025)09-1747-16

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2025.09.003

Construction and Application of Digital Thread for Manned Lunar Exploration Spacecraft

WEI Ping¹, YUAN Rui¹, WU Ziwei¹, FAN Songtao¹, WEI Zhengzhe², WANG Kailai²

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. Shanghai Atoz Information Technology Ltd, Shanghai 201101, China)

Abstract: In response to challenges of insufficient information transmission and excessive iterative work in traditional spacecraft development models, the manned lunar exploration spacecraft adopts model-based systems engineering (MBSE) methodology. An extensible and configurable engineering-level digital thread is established through integration of digital model systems and virtual-real data. Based on the meta-model template for manned spacecraft, a comprehensive data view is constructed to form a complete and globally unique truth source for complex spacecraft. The truth source reflects interrelationships among authoritative data, information, and knowledge within engineering development systems, enabling capabilities to access, integrate and transform heterogeneous data into actionable information for developers. The digital thread spans multiple disciplines including system architecture, mechanics and electronics, and is preliminarily implemented across three development phases: requirement analysis, system design and product design. Future extensions will cover the entire lifecycle including manufacturing, testing and operation/maintenance. By transcending traditional isolated functional perspectives, the digital thread demonstrates significant advantages in maintaining development information consistency, enabling automatic model transmission/transformation, optimizing development processes and facilitating global impact analysis.

Key words: Manned lunar exploration; Spacecraft digital thread; Model-based systems engineering (MBSE); Digitization; Full lifecycle

0 引言

“数字主线”(Digital thread, DTh)一词起源于航空航天工业,用于描述数字化支撑的集成化系统工程流程^[1]。从航天器系统和组件的3D CAD设计到系统的制造、组装和交付整个过程,数字主线对所有工作的输出进行数字化管理,形成权威真相源。在此前提下,数字主线涉及基于模型的系统工程(MBSE)、数字化图纸、数字化物料清单、制造流程、供应链与装配、配置管理和系统交付等全过程的信息和数据。

2018年7月5日,美国国防部正式对外发布“数字工程”战略^[2],其战略目标是:1)强化建模与仿真;2)统一管理权威真相源;3)充分利用数据技术的快速迭代和开放式接口来实现技术创新;4)建立相关数字基础设施和环境;5)文化和人力转型。美国国防部在其建设的“计算研究和工程采办工具与环境(CREATE)”中明确,权威真相源由数字主线承担^[3]。国内也同步加大了对武器装备研制数字化转型升级的推进力度,并形成数字工程启示和思考。陈建伟等^[4]提出,数据协同要覆盖产品研制生命周期的全流程、全要素,并利用数据共享通道对外提供统一的数据开发和服务能力。王巍巍等^[5]扩大了数据协同范围,指出工程需为产品本身及其数字孪生体提供访问、整合和转换的能力。

美国航空航天协会(AIAA)数字工程集成委员会(DEIC)认为,数字主线是整个生命周期都被主动管理的一系列与流程、产品或系统相关的权威数字信息集合。文献[6-8]提供了详细的数字主线定义、价值陈述和参考模型,并推荐了与业务案例、技术考虑、教育和培训相关的5个操作方向。

洛克希德-马丁公司(下称洛马公司)内部进行了MBSE的全部门深度应用^[9],其与“数字工程”的关系也最为紧密。2009年,洛马公司在F-35项目上提出了“打造闭环的数字线索”,随后又提出了扩展数字线索的“数字织锦”概念;其定义为流程、工具数据和人员的综合框架,集成整个产品生命周期和所有学科。“数字织锦”计划将复杂的装备系统设计、制造、运营和保障等全面地交织起来,构建覆盖企业全业务领域、数据高度集成、各学科建模和仿真高度紧密耦合的新一代数字化设计制造体系,从而更加精准地进行场景模拟;不断调整产品研制和

运营过程,以更加快速地响应不断变化的用户需求。从实际工程案例来看,洛马公司潜艇设计团队在全新潜艇电子系统的设计过程中,花费1年时间将原来的文档全部转化为系统模型,建模对象包括来自20个项目办的35套分系统、3 500条接口需求、500项服务、5 000个接口实体模型、15 000条模型元素之间的关系。通过模型化描述及关联分析的方式,其解决了过去复杂系统工程中变更管理不易开展的问题。

国内学者在数字主线方面也进行了探索性研究,但存在的共性问题缺少工程实践应用。周军华等^[10]提出了一种面向数字孪生的武器系统数字主线构建技术,利用数字主线和数据驱动来支撑数字孪生的演进。王焱等^[11]针对航空产品制造需求,分析了智能生产系统的结构、组成及关键要素,并根据制造过程中的信息流主线将智能生产过程分为两条数据链路,形成生产系统的数字主线。刘婷等^[12]探讨了将数字主线应用于航空发动机等复杂系统领域的可能性,提出了面向航空发动机的数字主线基本框架,从而实现实物空间内部、虚拟空间内部以及实物空间和虚拟空间之间的多个互联。此外,在煤炭、石油、电力、IT等领域,国内研究人员针对煤炭智能开采有效管理,石油长输管道设计、施工到运维整个寿命周期的数据传递,变电站作业流程监管数字化,企业生产过程安全预防的精准化与智能化管理等需求,进行了数字主线技术的相关应用研究^[13-15],分析了数字主线应用的关键点和系统中数字主线的作用。朱迪等^[16]融合数字主线和知识图谱,优化了信息系统结构化设计,增强了系统可靠性。

国内工程应用上,王国庆等^[17]总结了航天系统工程2.0概念,提出统一、全量的模型数据体系需贯通型号全周期、全层级,并依据同源模型全周期迭代来实现工程信息传递。戴璐等^[18]使用软件数据孪生纽带,实时、持续地保证保持架在需求分析、设计、生产、运维全阶段的映射,持续使用数据修正优化模型孪生模块。中国商用飞机有限责任公司依托工信部揭榜挂帅项目,构建了民机制造运营数字主线体系框架^[19]。其将数字主线视为多业务流程协同工作的平台框架,约束模型的数字化标准和流程,精确获取实体全要素,从而实现制造运营全流程链条的动态重构与数字交付。在数字主线上,商飞还将构

建面向制造、运营全时空服务的数字飞机平台,实现对飞机零件、装配、测量、质量状态的实时监控、预测和维护,进而实现飞机在制造、交付、运行维护等全生命周期内的数字化模拟和优化。项目的初期目标是突破C919飞机系列化生产推演与优化技术,使得在单机十万级工序下,产线利用率提升20%以上,千工时质量问题发生率降低20%以上,数据流转问题人为因素降低20%以上,支撑年产能新增100架以上。

首先,本文紧密围绕型号数字化研制要求,分析了数字主线能力建设规划,针对型号研制现状开展了数字工程方法应用相关研究。然后,系统分析了数字主线关键技术,构建元模型设计基础,分别在数据接入、关系构建、应用构建、服务构建等方面明确了数字主线的核心机理和设计方法。此外,根据型号研制需求,探讨了跨域、跨阶段协同的落地场景,自顶向下地整理了数字主线在方案论证、详细设计、生产制造、测试验证、飞行演练与运维等阶段的工程探索及初步成果。最后,提出了后续数字主线建设方法和针对载人月球探测深化应用的发展建议。

1 载人月球探测航天器研制数字化现状

1.1 载人月球探测数字化问题分析

围绕“实现基于模型的航天器数字化研制”的工程管理目标,载人月球探测航天器以“模型驱动”和“仿真验证”为核心,系统组织梳理、优化、变革航天器研制、生产全周期的业务流程和工作方法,将数字化技术与航天器研制工作进行了深度融合^[20]。

载人月球探测工程实践、探索了航天领域基于模型的工程方法,构建了由数据、状态、行为和与其他模型关系组成的各类模型,并将其划分为需求模型、功能模型、产品模型、实做模型、制造模型、交付模型6大类^[21];推行基于以上模型的唯一数据源控制,实现相关模型之间的数据互联互通。目前,在载人月球探测航天器研制各环节,已经开展了大量的数字化工作^[22-23];其强调需求、设计、仿真、验证活动的一致性与复用性,在软件工具中获得各类设计参数的影响关系,实现了航天器总体设计优化。但其仍存在以下不足和薄弱环节:

1)数据难共享,关系不明确。现有数字化工具链中存在各种应用系统和不同数据服务,但是各个

应用之间不能实现可控的数据共享,且不明确的数据关系也难以满足工程在数据可控、安全管理等方面的需求。

2)数据流转靠手动。上游数据在下游工程活动中自动化程度不高,相关人员无法实时、直观地查看业务实际需要的数据集合,数据流转效率差。

3)载人登月工程难度高、任务重、影响大,问题分析闭环需彻底。针对出现的质量问题,在追溯需求、设计、制造、原材料、工艺、研发等信息时,需要跨多个系统,人工操作众多模型,其过程非常繁琐。

4)缺少全局分析和决策。载人航天器研制历经数十年的自主发展,在论证、设计、制造、测试、在轨运行阶段存在多种辅助工具,数据的类型、知识的深度都极其复杂,业务过程、结果的数据域关系不清晰,无法开展数字化全局分析和决策。

5)模型和实际不一致。航天器数字孪生和智能研发需要可信的工程数据,需确保物理产品和孪生产品使用同源数据,否则极易造成模型和状态不一致。技术状态的变化也可能导致模型与实际脱节。

伴随航天器数字化研制的深入开展,参照洛马公司数字主线建设思路,载人月球探测航天器研制团队在新一代产品生命周期管理(Product lifecycle management, PLM)平台上探索了数字主线技术,完成了工程部分的验证。研制团队按照“前期整体探索,初期部分实施,后期完善调整”的思路,构建了整体的方法和技术,初步连接基于模型的需求管理、系统设计、产品设计等工程中的工具和流程,使用统一图结构来存储模型状态,将模型彼此链接(关系),维护数字模型之间、其与实际产品(从航天器到单机)之间、外部单位(实体)和航天器实际产品之间的一致性。数字主线技术探索阶段还涉及管理模型行为的执行环境,利用数字主线的集成功能进行自动化的跨模型追踪和分析。

按照INCOSE敏捷系统工程生命周期管理(ASELCM)^[24],载人月球探测工程梳理了航天器研制涉及的系统对象(见图1)。其由内至外分为航天器系统、航天器全生命周期数据、企业研制体系3层。数字主线居于中间层,负责观察和改进内部航天器系统及其环境,可以支持多个航天器实例并行研制。数字主线信息的主要直接消费者是中间层的载人月球探测航天器工程师团队。

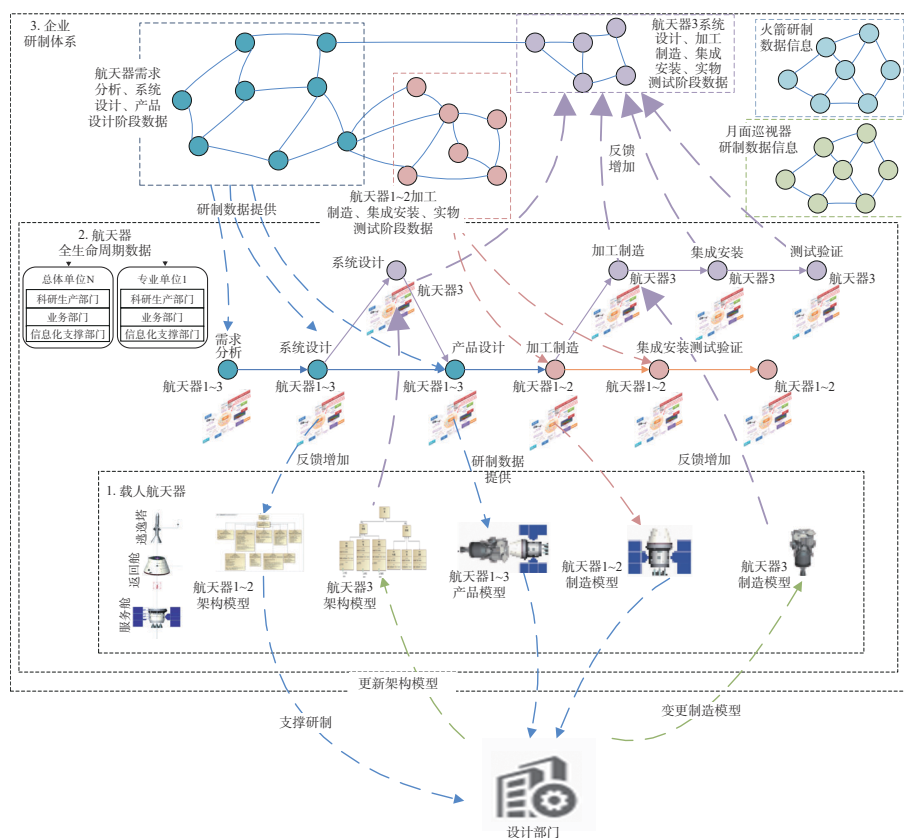


图1 航天器研制涉及到的三层系统对象

Fig. 1 Three-tier system objects involved in spacecraft development

综上,数字主线的核心作用是在工程的整个生命周期内,加速和促进航天器工程师团队构建,维护和使用模型、仿真数据、试验数据和相关元数据,对外提供工程双向全局追溯和一致性信息,对内提供 workflow 自动化和模型复用服务。数字主线使用全生命周期的跨领域数据,连续辅助工程师获取真实状态并掌握海量信息,用模型间确认过的关系和前期业务数据自动生成后续业务模型,推动工程师高频次、小迭代的研制工作。

1.2 数字主线能力体系

数字主线是一个模型和数据的管理系统,旨在打通上下游、不同专业和不同格式数据及模型间的接口,实现工程内数据源的统一。数字主线可以为载人月球探测航天器提供数据汇聚与组织、数据可追溯性、数据一致性、流程自动化、数据分析、知识复用能力,解决型号研制中权威真相源缺失的问题。数字主线构建确立6大目标:聚模型、破孤岛、拆烟囱、控全局、促孪生、强智能。

面向载人月球探测任务中,多个航天器型号的数字主线构建与应用,将以航天器研制业务为核

心,对各工程活动产生的模型和数据解耦、重构和汇聚,打破专业和领域的孤岛,拆除不能数据共享的软件工具烟囱,开展数字化全局指标分析和变更影响全局控制,使用设计航天器的同一套模型和数据来促进数字孪生成熟,最终实现强智能化的优化设计和动态决策。

数字主线基于数字主线管理平台搭建,基于模型和数据构建“数位化”能力,基于知识图谱和算法开发“智能化”能力。功能上,依托新一代PLM平台的统一门户和基础支撑模块,构建出对象建模引擎和关系规则引擎;通过配置不同模型的数据接入服务,支持数据汇聚与组织并提供全局指标参数追溯和全局参数差异比对,赋能航天器全生命周期研制。其架构如图2所示。

型号需在数字主线管理平台上建立各阶段数据之间的全链条高度非线性关联关系,并与详细设计、工艺、制造、服务、回收阶段的数据进行对接,最终构建贯穿航天器全生命周期的数字链条。为了实现工程各阶段数据之间,全链条关联关系的维护、展示、使用等功能,依据定义好的航天器元模型

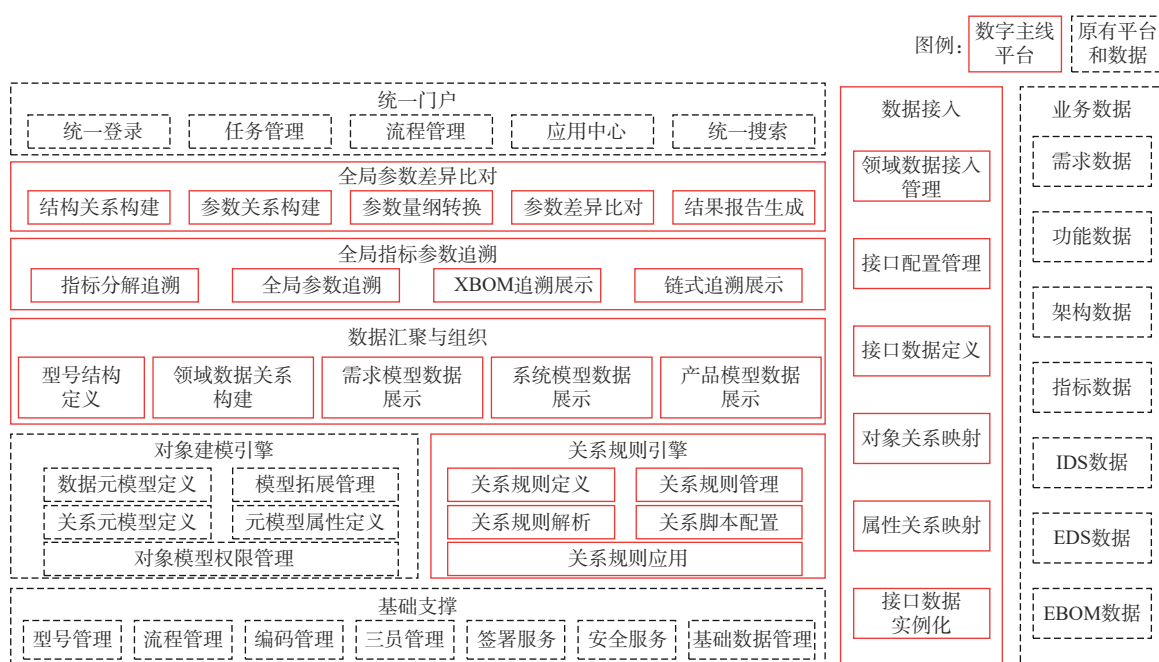


图2 数字主线管理平台架构

Fig. 2 Digital thread management platform architecture

创建针对多个平台的规范、标准的连接,形成工程数据连接的“高速公路”,实现针对数据中多个系统的连接,达到权威真相源的效果。

2 数字工程方法

2.1 改进后的钻石模型方法

载人月球探测工程研制过程遵循MBSE方法的“V”字模型,形成了系统需求到系统设计、产品设计到测试验证、系统需求到运行维护3个不同长度的

闭环验证工作。在基于模型的系统工程方法和6类模型体系基础上,载人月球探测航天器研制团队改进了钻石模型^[25],以“一切皆可建模、实物产品必有数字模型”的思路,用标准、可复用的权威数字模型来体现工程的系统特点。模型具备同源传递,前后关联交织,历史变化演进,由数字主线承载工程的关系特点。基于测试数据和试验数据修正模型参数,确保模型的仿真状态接近实物运行状态。数字主线连接物理空间与数字世界的方式见图3。

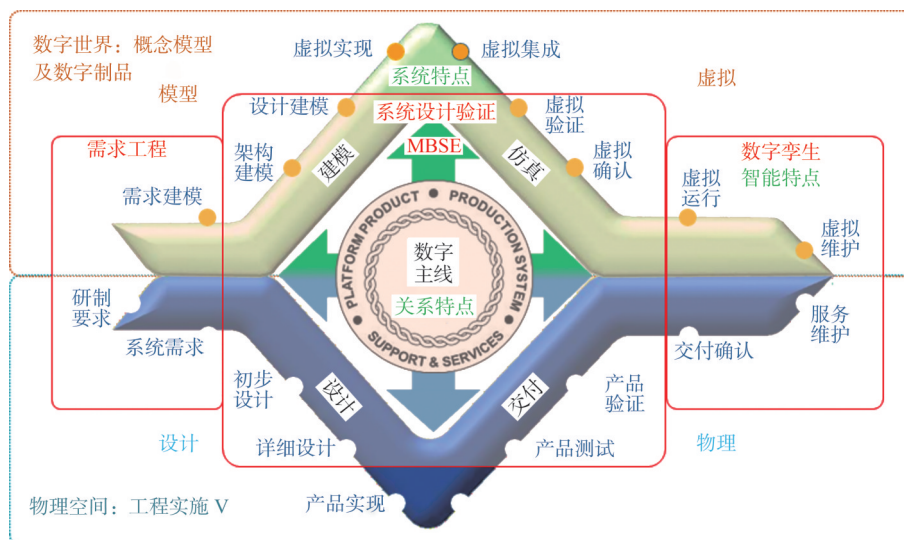


图3 改进后的航天器“钻石”模型

Fig. 3 Improved “diamond” model for spacecraft

2.2 三元组驱动的知识推理方法

针对复杂的工程关系,数字主线统一了规范与知识增强表达,以实体及其关系为核心,将结构化文本(需求模型)、形式化图形或代码(系统模型)、三维定义(产品模型)、MBOM(制造模型)等多模态信息表示为多模态知识图谱中的三元组:

$$V = (E, R, T) \quad (1)$$

式中: V 为数字主线的边集合; E 为工程中各类实体集合; R 为关系集合; T 为事实三元组集合。每一个三元组 $(e, r, t) \in T$ 表示 $e \in E$ 和 $t \in T$,且在 e 和 t 之间存在一个关系 $r \in R$ 。

数字主线索引并解读原有模型中的文字、SysML视图、Modelica 模块、IDS 接口表、EDS 结构化数据、三维CAD/CAE等模型信息,根据载人月球探测航天器定义的元模型规则,将其校验后转化为数字主线统一规范的实体、关系、事实三元组表达形式。首先,通过模型特征和数据特征对实体描述进行相互补充;其次,利用关系的模型特征建立头、尾实体间的联系,起始联系可以由元模型提供;最后,采用多模态正采样策略生成正样本,并与人工关联样本一起进行训练,让模型更好地发掘到正确三元组中的语义信息,以增强模型对数字主线中缺失实体或关系的预测能力。

根据航天器语义描述识别SysML模型和三维模型,先检测模型内容和参数所属分类(Req、Function、Logical、Physical),再建立前后逻辑明确前后关系(From、To);然后根据组合规则,人工关联或自动生成每一项内容和参数的具体关系,例如以下两个三元组:(From: SysML中太阳能帆板 Function, 关系: 精化, To: 需求文本中的能量转化要求 Req)、(From: 三维模型中太阳能帆板 Physical, 关系: 实现, To: SysML中太阳能帆板 Logical)。结合SysML系统模型内部的功能分配过程,工程师可以推理需求中能量转化要求对应的三维实体,并根据BOM等信息以及传递关系,预测需求变化对产品模型选装选配的影响,继而指导型号研制。

数字主线知识推理的核心机理是通过分析和利用多模态知识图谱中实体间的关系和属性,采用逻辑规则、统计方法或机器学习技术,从已知事实中推导出新知识或识别错误知识,包括知识图谱补全和去噪,如连接预测、实体预测、关系预测和属性预测等操作,以实现航天器知识的扩展和信息的精

炼,具体关系见图4。未来,其将能够根据自然语言智能识别工程师用户的意图,预测其痛点问题并将其转化为对数字主线的诉求,结合具体应用场景重组三元组,抽取出关键信息及属性值,形成明确的返回语句和模型结果。

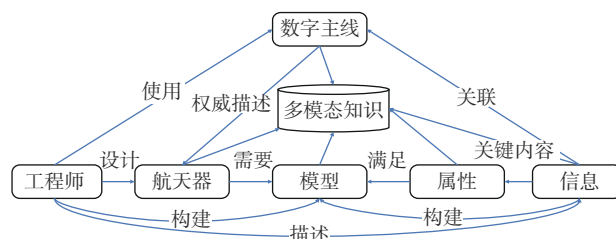


图4 数字主线中知识推理的核心机理

Fig. 4 Core mechanism of DTh knowledge reasoning

3 数字主线关键技术分析

数字主线在专用语言建模、关系规则、数据接入、汇聚组织和全局追溯5个方向,结合工程实际需求和技术难点,系统梳理出以下关键技术。

1)专用语言建模:采用载人月球探测航天器领域专用语言建模方法,解决模型表达层面不一致的问题。构建明确的数据关系和共享机制,促进软件工具链对工程模型的统一理解。该方向涉及领域知识提取、领域元模型构建和领域元模型建模3部分。

2)关系规则:工程中众多隐性研制关系需要通过业务规则识别出来,例如IDS设备和EBOM设备可通过设备代号一致性建立关联关系。为提高数据流转的自动化程度,需构建关系规则引擎,制定业务规则并执行,以完成隐性业务关系和挖掘类关系的建立。

3)数据接入:数字主线将接入超过10个复杂业务系统的数据。为实现能灵活对接多个业务系统数据,需通过构建数据接入关系规则为模型提供完整的数据来源,并完成多模态业务系统数据与唯一数字主线数据的完整转化,帮助工程师跨多个系统操作众多模型。

4)汇聚组织:航天器研制涉及的数据结构复杂、版本多变。数据汇聚与组织技术负责数据展示,直接影响工程师对信息有效捕捉的效果。数字主线获取的数据通过关系规则关联至系统节点,按照不同领域、业务使用场景汇集全局正确的设计、制造、验证等工程信息,辅助全局分析和决策。

5)全局追溯:全局定量类指标来源不清,间接导

致了现阶段 MBSE 建模不能利用总体设计技术成果。针对数据难以贯通的问题,需利用系统设计初期的指标分解关系和参数验证关系构建全局指标参

数追溯关系,并按需维护双向追溯关系以确保后续模型与实际产品一致,使模型更加贴近航天器研制。

按照上述5个方向梳理的关键技术见图5。

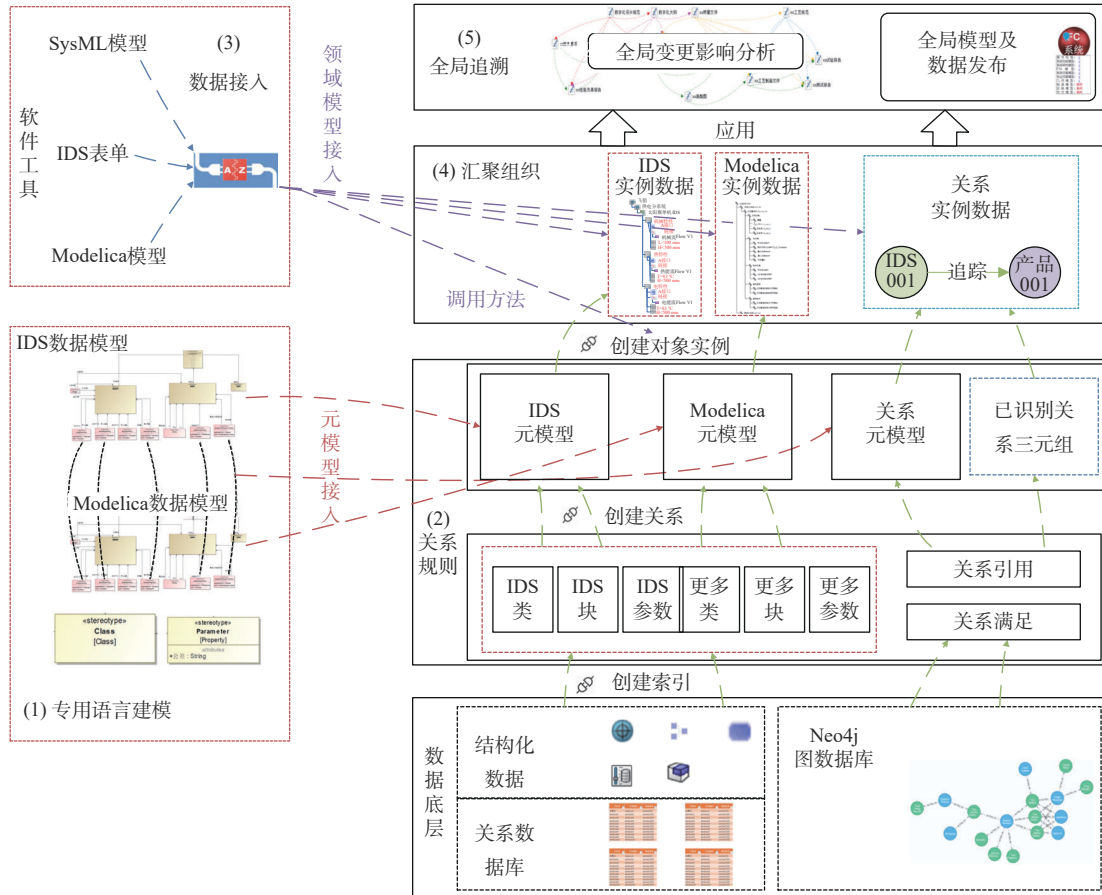


图5 数字主线五大关键技术的关系图

Fig. 5 Relationship diagram of DTh five key technologies

3.1 载人月球探测领域专用语言建模方法

数字主线中的载人月球探测领域专用建模语言(DSML)方法从领域知识提取开始,基于元对象机制(MOF)规范构建领域元模型,形成本体、模型和元模型组成的模型域三角形语义网;将其应用于载人月球探测任务的方案设计、详细设计等多种应用场景,指导数字主线开发基于业务对象的、通用的数据表达能力。图6中,内部映射的概念域三角形语义网由概念、参照物和符号组成,以本体映射领域概念,以元模型作为一套语言符号集,以对领域概念的描述结果作为参照物。

载人月球探测领域元模型与SysML通用元模型的建模过程基本一致,二者所建模型也承载相同的系统设计信息。二者的区别主要体现在两方面:一是解析模型的数据需要以元模型为单位,不同元模

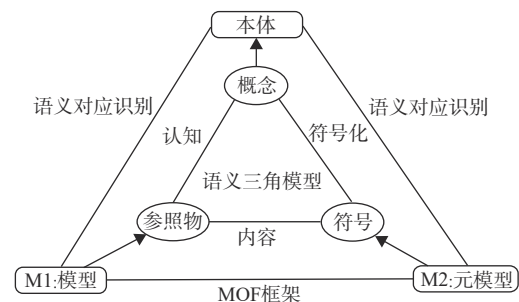


图6 领域专用语言的三角形语义网

Fig. 6 Triangular semantic network of domain language

型的解析方式不同;二是采用领域元模型构建的模型质量更好。SysML通用元模型抽象层级较高,与载人月球探测领域结合不紧密,难以对领域知识进行正确表达,容易造成理解不一致、交流困难的问题。基于SysML通用元模型向领域扩展形成领域专用语言建模,是在面向数字主线的航天器研制领域

封装基础上进行的,可有效描述各类模型参数的具体语义信息,高效率地进行映射和转换。DSML基于最佳实践经验构建,构建的模型统一、规范、标准化程度高,更容易实现模型间的互操作。其是数字主线实现价值的重要保障,可快速支持其他业务复用。

以载人航天器捕获系统模型中的实体实例为例,以文件、资料、专家等作为输入数据来源,先获取包含实体实例以及实体实例间关系的所有相关实体结果,再通过关系连接捕获能力实例、系统实例、任务实例、性能实例、工程实例等实例。由“载人航天器”与“入轨”实例之间的执行关系,可以分析出“飞行器”与“飞行器功能”之间的执行关系。同时,由“测控通信系统”、“发射场系统”、“着陆场系统”与“载人地月往返”之间的执行关系,可以分析出“载人航天工程系统”与“载人地月往返”之间的执行关系。数字主线围绕 DSML,对载人航天器研制过程中表达不一致的实体实例进行聚类 and 综合分析,合并同类项并删除不符合标准的实体实例。随后,建立实体实例之间的关系,如关联、泛化、依赖等,将各模型中出现过的不同实体实例向领域统一实体层级抽象,最终获取领域权威实体,结果见图7。

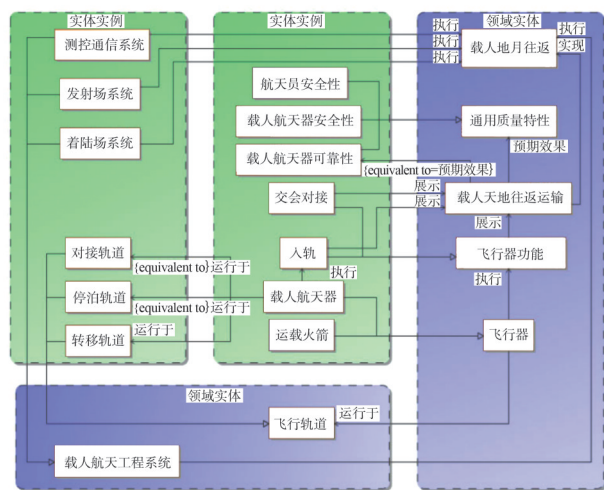


图7 领域权威实体获取结果

Fig. 7 Results of domain authority entity acquisition

3.2 关系规则触发执行方法

关系规则触发执行方法定义了载人月球探测航天器工程规则,解析后触发执行。方法总体功能框架分为3部分。

1)规则定义及管理:根据载人月球探测航天器的实际业务需求,可通过可视化配置或领域专用语言中的规则部分来定义业务逻辑。可视化配置界

面可通过页面配置构建业务关系,规则脚本通过定义类似于“IF-Then”的业务逻辑来建立并执行业务关系。航天器应建立规则管理机制,包括规则的创建、修改、删除和测试。通过规则管理,能够轻松地添加新规则或更新现有规则。

2)规则解析:主要用于解析脚本定义的关系规则。解析器能够理解规则的语法和结构,且可以代入规则脚本中的输入参数。

3)规则执行及应用:根据设计、制造、运维等业务需求定义触发规则执行的机制。评估规则执行的条件,条件评估为真时,执行器执行规则定义的动作并访问和操作图库数据,生成关系数据。

方法的触发机制及执行条件分为两类,即事件触发和时间触发。事件触发以配置事件监听器的形式插入业务过程,以便在工程师传递模型、功能按钮点击或系统状态变化时触发规则执行。时间触发用于执行定时任务,按照预定的时间表(如每晚)自动执行规则,并刷新关系数据以保持数据的时效性。规则引擎根据预定义的触发条件和调度策略,动态地调度并执行规则;在规则执行过程中,引擎与图数据库进行交互,查询所需节点和边,以收集执行规则所需的数据信息。引擎将识别并定义规则执行过程中需要生成的关系数据,按照标准化数据结构生成关系列表,格式如下:

```
{“fromObjectType”:[类型],“fromObjectId”:[唯一标识符],“toObjectType”:[类型],“toObjectId”:[唯一标识符],“relationshipType”:[关系类型]}
```

3.3 多模态数据接入与统一转化方法

多模态数据接入与统一转化方法首先接收从模型现有软件工具接口中传递来的领域业务实例数据,根据属性映射配置识别元模型中各属性与领域数据之间的对应关系,在数字主线数据库中创建包含业务数据的结构和语义数据模型实例。在数据模型实例化之后,再根据映射关系将具体数据值填充到相应的属性中,包括实体的属性和状态信息;同时补充描述实体之间联系和交互的关系数据。关系数据将使用图数据库的三元组进行存储,以节点和边来表示实体及其关系,便于后续处理复杂的网络结构和关系查询。

在数据存储过程中,方法还需确保数据的一致性和完整性,避免数据冗余和错误。为了确保追踪数据对象随时间变更,方法引入一个名为

Version的属性,其将以String字符串的形式记录数据对象的版本信息。这种格式选择具备灵活性,可以包含多个不同业务系统中版本变化的表达形式,以确保实例化后的数据对象能够反映其在源系统中当前版本的状态。版本信息不仅应用于历史记录,还可应用于数据比较、回滚操作、数据追溯等多种场景。

以IDS领域数据为例进行说明。IDS用于承载

航天器单机的接口特性和参数信息,其主要包括单机设备数据类型和参数数据类型,覆盖单机标准化表单中详细的接口特性和参数设计信息。如图8所示,单机设备数据类型包括分系统名称、设备代号、设备名称、所属舱段、型号代号、研制单位、研制阶段等属性,参数数据类型包括数值型、布尔型、图片等。IDS领域具备的关联关系为“单机-参数”,其表达了单机设备与设计参数之间的关联关系。

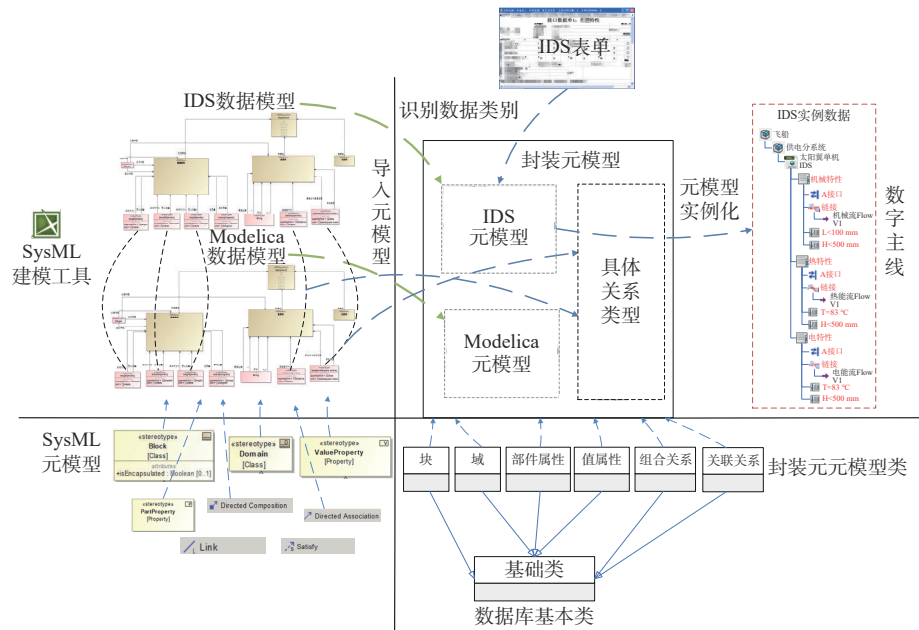


图8 IDS接口数据接入及关系转化

Fig. 8 IDS interface data access and relation transform

3.4 数据汇聚与组织方法

首先,通过数据汇聚与组织方法建立航天器系统结构,形成无多种分支的唯一系统分解结构,分解至相对独立的功能件或可拆装的模块,不分解至零件级,不表明安装位置关系。随后,从领域元模型抽取领域内的系统、分系统、单机设备与系统结构节点的关联关系。最后,使用关系规则匹配、手动建立关系映射两种方式,将数字主线接入的领域数据关联至系统结构节点。例如,依据唯一标识对图9中航天器逻辑架构的节点、IDS设备、EDS设备、EBOM节点等数据对象进行汇聚。

3.5 基于指标参数的全局追溯方法

基于指标参数的全局追溯方法负责建立航天器最广范围的指标参数间分解关系,及其与各类实体间的分配关系。全局指标参数的追溯覆盖载人月球探测航天器整个生命周期各阶段的指标参数设计结果,并利用系统设计初期的指标分解关

系和参数验证关系构建全局指标参数追溯。方法在航天器研制中面临如下困难:指标存在于系统层、分系统层和单机层,而参数只在单机层规定;指标存在需求值、设计值、测试值,而参数仅存在设计值。

首先,基于指标参数的全局追溯方法抽取指标信息,其产生于系统架构设计过程中对各层级系统性能需求的定义,通过审签受控的系统架构模型得到最终确定的指标。然后,建立指标间的初始分解关系,再自动检索关系并将指标与系统逻辑架构关联,后台重组形成指标分解结构树。最后,利用获取到的指标各阶段数值,以系统架构为关键节点,挂接指标后形成指标的正式分解关系并形成追溯图,通过关系推理快速识别指标之间的影响关系。

以图10中的飞船重量和功率指标三层追溯为例,指标参数追溯读取系统架构组成骨架节点,如飞船、GNC分系统、供电分系统等,利用指标分解中

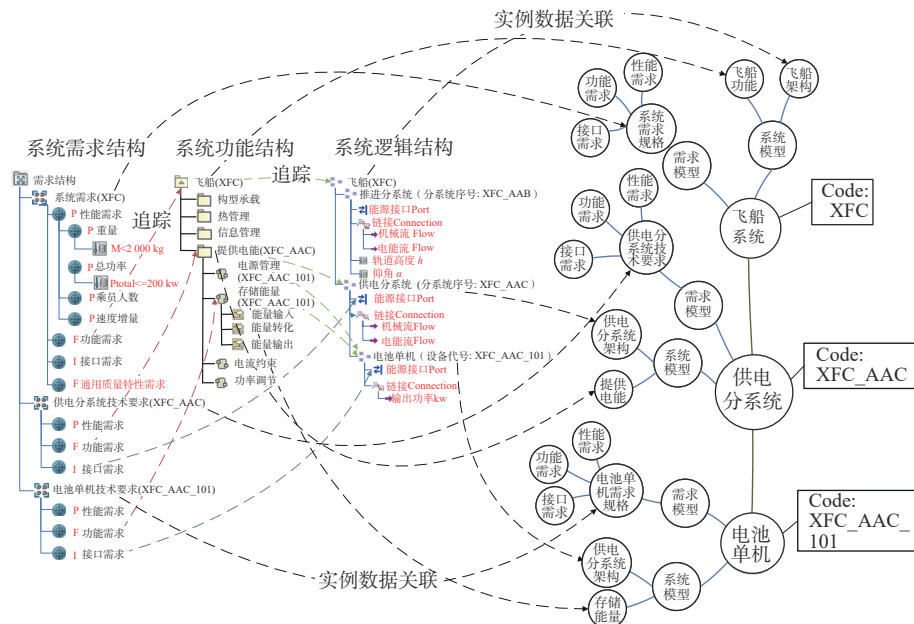


图9 业务数据汇聚与组织方法

Fig. 9 Aggregating and organizing business data methods

提取到的指标分解关系扇形发散,展示指标项分解情况,并在每个指标项后将指标要求和指标验证中解析得到的需求值、设计值集中在一起。其中,单机层会以指标设计值的形式展示参数,完整展示航天器重量、功率、热耗等各项指标的参数分解及追溯关系。

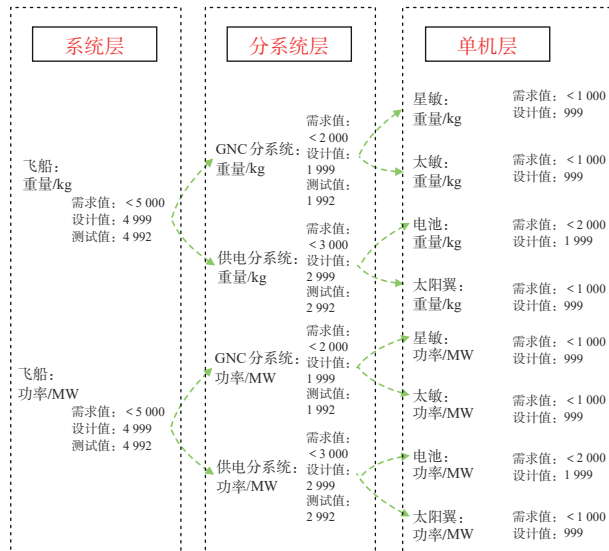


图10 基于指标参数的全局追溯层级

Fig. 10 Global traceability levels based on specifications

4 载人月球探测航天器数字主线应用场景分析

首先,载人月球探测航天器利用经领域专用语言优化后的MBSE方法,将SysML形式的系统模型

提升为工程信息的核心部分,构建跨学科的数字主线核心关系规则;其次,通过数字主线管理平台接入MBSE业务数据、系统仿真业务数据、IDS业务数据、EDS业务数据、EBOM业务数据,将涉及的需求模型、系统模型链接起来,作为单一的权威真相源,以全局追溯服务支撑跨阶段的数字化协同研制;最后,将三维设计软件和流程协同平台接入数字主线管理平台,进行SysML系统模型与Creo产品模型的协同修订与配置管理,获取分析所需的所有关键性能参数,以有效支撑技术状态变更管理,减少信息传递错误和返工,加快设计研发速度。通过数字主线管理平台的实施与应用,载人月球探测航天器型号在追溯管理、信息灵活性、变更控制、问题解决等方面的能力均有所提高。

4.1 全局追溯应用场景

通过工具手段建设和模型优化,载人月球探测航天器已经对系统模型数据进行管理并解析,得到了需求、功能、逻辑架构的结构化模型;构建了需求树、功能树和逻辑结构树之间的追溯关系,覆盖了型号研制的系统设计过程,并结合指标分解分配关系提升了全局一致性追溯能力。

首先,总体基于已有的需求树和逻辑结构树,查询、存储了各层级指标的需求值和设计值;在系统测试完成后,也可以基于系统测试验证模块获得指标的测试值。需求值体现了指标设计要求,设计

值反应了指标的设计结果,测试值代表最终的实物指标性能。指标的分解关系则可以通过指标的需求层级对应逻辑结构树的层级;平台自动检索关系并将指标与系统逻辑架构关联,后台重组形成指标分解结构树。同时,利用获取的指标各阶段数值,以系统架构为关键节点,挂接指标后形成指标的分解追溯图,最终实现全局指标参数追溯。

对于结构化的模型对象数据,固有的组织方式为树形结构,比较适合以XBOM方式,按数据组织以及业务过程展现跨领域的数据关联。文档、模型对象及其关联关系属于单节点的关系,初始配置为“节点-关系”的链式图形式化展示。二者在底层转化为数字主线上统一关系图谱形式的图数据库结构,以便基于三元组进行知识查询和推理。3种数据组织形式见图11。

经过型号研制系统设计阶段的建模、解析、验证,载人月球探测航天器数字主线围绕重量、能耗、控制精度等核心指标,构建了自任务需求至单机技术要求的5个全局追溯视图,100%覆盖了指标在整个设计周期的演进过程。实施中发现6处指标不协调的地方,提升了设计一致性质量。

4.2 技术状态变更管理场景

技术状态变更管理以配套管理系统、相关设计模型的管理系统为数据源,在载人航天器更改发起

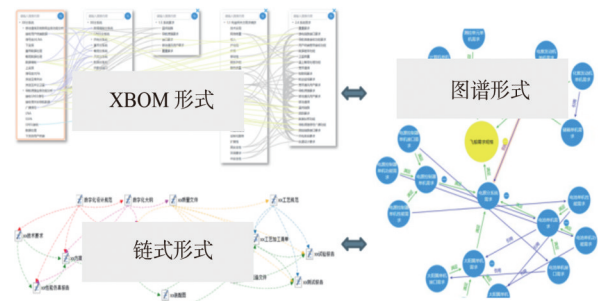


图11 飞船全局追溯场景中的多重追溯形式

Fig. 11 Traceability forms in the global traceability scenario

时,在更改单中初步确定更改内容涉及的项目,并通过数字主线更改影响域分析功能给出可能相关的、需要落实的文件、模型和产品清单。用户对更改、落实方案和时机等补充完善后,形成正式的更改单用于审批受控,更改落实管理模块可以从受控的更改单中提取需要落实的文件清单和实物清单。数字主线预先配置可能存在影响的相关型号,从基础配套所在的型号中进行多项选择,如飞船、着陆器等。实际应用参照图12的关系,在数字主线中记录6类内容变化:1)机械特性:包括重量、外形尺寸等;2)电特性:包括功耗、工作模式、协议等;3)热特性:包括热耗、比热容、温度要求等;4)机械接口:包括安装孔位、安装要求、管路接口等;5)电接口:包括电连接器节点、电缆要求等;6)增删配套:包括设备、电缆、软件、管路、直属件等。

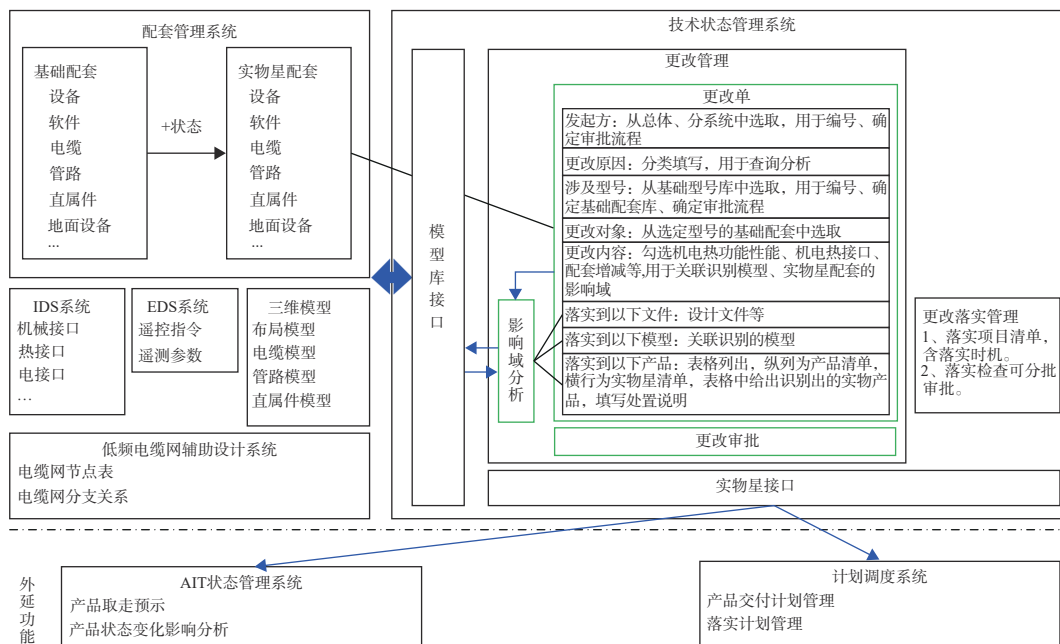


图12 飞船技术状态变更涉及系统组成

Fig. 12 Systems involved in spacecraft configuration change

针对技术状态变更前后的全局比对,首先,完成设计参数的差异化比对,确保不同数据源和业务系统之间的数据同步和协调。其次,根据获取的阶段模型和数据,开展3个层次的数据比较:1)内部数据比较:通过比对数字主线内部数据源确保数字主线中数据的准确性和权威性,提高后续根据数字主线上数据进行设计的准确率;2)权威数据源与业务系统数据比较:以数字主线内部数据源为基准,将各业务系统最新数据与数字主线权威数据源比对,验证各业务系统参数设计的准确性,以提高各业务系统中设计参

数的质量。3)业务系统数据比对:通过比对各业务系统最新数据,发现当前设计过程中存在的差异,并及时进行调整修改,以确保各业务系统参数设计的一致性。最后,生成差异比对结果的详细报告,见图13。报告中包括进行比对单机的基本信息,比对的业务领域、参数范围以及参数值和匹配结果。

经过型号研制系统设计阶段的管控、验证,实现了数字主线记录的6类数据100%数字化受控,准确识别了问题产生的技术状态因素,完善了型号质量问题闭环机制。

A01设备基本信息							
型号:	XF	分系统:	GD分系统	设备名:	A01	设备代号:	A01
研制阶段:	C	研制单位:	A	舱段:	B	版本:	C
序号	特性类型	IDS参数	IDS参数值(单位)	IDS公差/范围	Modelica参数(备注)	Modelica参数值(单位)	匹配结果
1	机械特性	质量位置1	10 mm		设备质心1	0.01 m	匹配
2		质量位置2	11 mm		设备质心2	0.01 m	匹配
3		质量位置3	12 mm	±1	设备质心3	0.01 m	不匹配
4		单间质量	100 kg		设备质量	100 kg	匹配
5		过质心惯量1	1 kg×m ²		相对于质心的转动惯量 1	1 kg×m ²	匹配
6		过质心惯量2	1 kg×m ²		相对于质心的转动惯量 2	1 kg×m ²	匹配
7		过质心惯量3	1 kg×m ²		相对于质心的转动惯量 3	1 kg×m ²	匹配
8	电特性	XXXX					未识别
9		电热转换效率	N		电热转换效率	N	匹配
10		额定电压	V		额定电压	V	匹配
11	热特性	恒定功率	W		恒定功率	W	匹配
12		平均热耗	1 W		设备热耗	1 W	匹配
13		热容量	1 J/K		设备热容	1 J/K	匹配
14		安装面接触面积	1 mm ²		安装面积	0.001 m ²	匹配
15		安装面粗糙度	0.05 μm		安装面粗糙度	50×10 ⁻⁹ m	匹配

图13 技术状态变更对比报告

Fig. 13 Comparison report of configuration change

4.3 基于模型的上下游沟通场景

用户在航天器立项论证、方案设计等生命周期早期阶段影响设计决策,而各承研单位在方案设计、详细设计、生产制造等型号中期阶段需要密切协同,数字主线是任务产生新项目的基本条件和新要求顺利传导的“润滑剂”。数字主线在基于模型的环境中提供关于航天器产品要求和标准的权威数字模型,从而提前纳入装备研制、生产、维修及保障等流程中的要求,及时改进优化产品设计及研制,形成闭环。同时,数字主线有助于开发者重新审查不同组件要求相关的所有决策,使设计规范更容易满足设计要求。飞船形成“总体和分系统通过数字主线开展上下游沟通”的协同研发模式,如图14所示。

航天器总体单位发布了飞船SysML系统需求模型。在工程的数字主线上解析系统模型中的飞船需求,将其捕获到新一代PLM平台的需求管理模块,并将需求库链接到SysML模型的需求块中。负

责GNC分系统研制的团队承接飞船SysML模型,以“使用”关系继续开发分系统的架构SysML模型,并将GNC系统上的某些属性链接到SysML中的特定需求,例如分配给硬件组件的最大资源使用率。GNC分系统承研单位通过SysML向航天器总体单位提供GNC分系统的快照。对于数字主线中有扩展的模型,航天器总体单位可以依据SysML模型的参数图自动分析最大资源使用率。

经过型号研制系统设计阶段的实施与验证,利益相关方可实时在数字主线的可视化看板上看到全局影响分析报告,拉取和复用对应的SysML模型开展相关变更工作,减少60%的上下游沟通时间。

5 数字主线发展建议

数字主线是上下游产品和过程信息的集合,它打破“孤岛”系统和数据,实现了信息连续性并允许在整个企业范围内随时随地访问数据和信息、跨组

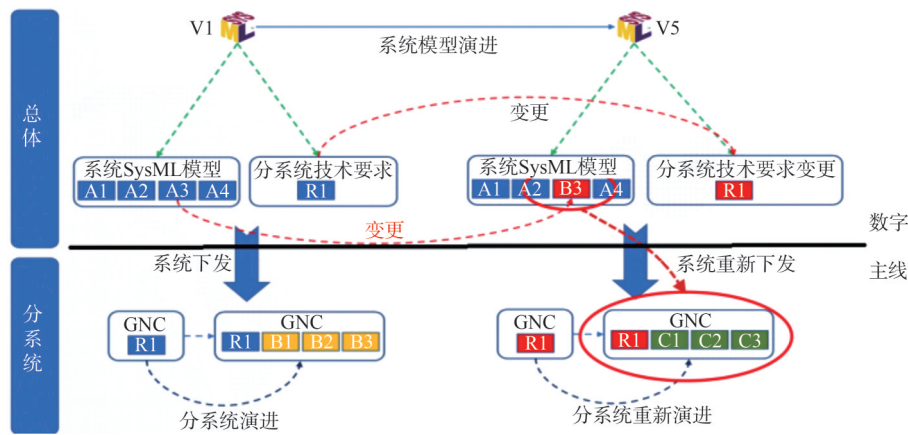


图14 基于模型的上下游沟通场景

Fig. 14 Communication scenarios based on model for upstream and downstream

织执行跨部门流程,实现跨团队和系统(从工程到制造、服务和现场)的双向工作,从而真正在工业和制造企业落地数字化转型。根据数字工程生态系统组成(见图15),数字主线将在需求分析、架构开

发、设计和成本权衡、设计评估和优化、系统/分系统/单机的定义和集成、工程成本估算、培训辅助工具和设备开发、开发和操作测试、航天器运行支持等领域发挥重要作用。

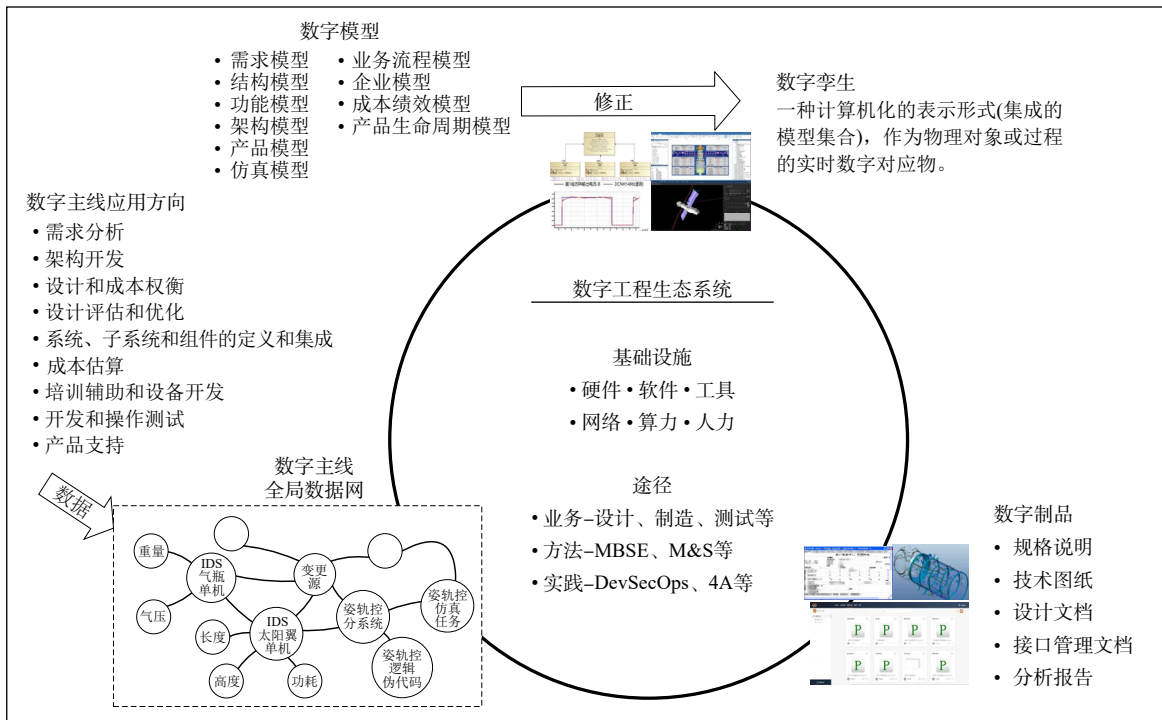


图15 数字工程生态系统组成

Fig. 15 Digital engineering ecosystem components

当前,“数字主线”概念相当重要但又处于发展的早期阶段。尽管不少工业和制造业企业都制定了自己的数字主线项目及时间表,但项目实施的时间和结果却可能出现极大差异。这主要是因为业界尚缺乏成功、卓越的实践。载人月球探测航天器

研制团队对数字主线的推进遵循“大处着眼,小处着手”的实施策略,首先进行全局规划,以便在分解组件后各部分能重新组合在一起;然后逐步实施。目前,以五院新一代PLM平台为基础,从连接设计和仿真验证开始,实现从产品数字设计到BOM转

换、流程规划和验证的可追溯性及连接性,并逐步形成整个生命周期BOM的数字主线。数字主线还需要延伸到制造工艺的设计和执行过程,让制造工程师与设计工程师协同工作,以规划制造流程、工具和设备。数字主线还要基于标准化零部件目录,让工程师轻松找到需要集成到设计中的零部件数据。

更为重要的是,实施数字主线还需要涵盖从航天器CAD设计师到制造和供应链的“团队”,这个虚拟“团队”的合作是从各种互连流程中获得价值的关键。因此,数据管理变革和团队管理变革是实施数字主线的基础。后续工程数字主线实施过程中,将以航天器虚实试验验证、实做模型应用、任务系统仿真等特定应用场景为驱动,包括需要建立什么样的数字模型,数据来源于哪些业务系统,如何去连接这些系统,如何智能化应用等。完成一个场景的建设后,再逐步延伸到下一个场景;同时,还需在航天器研制阶段不断优化迭代前期的模型,最终形成完整的数字网络。另外,健全的数据治理和清洁的数据库对于数字主线的成功推进具有非常重要的作用,特别是在数字主线应用激增的情况下。

5.1 融合数字孪生的统一框架

在现有数字主线的建设中,仅考虑航天器物理产品以及系统仿真的权威真相源应用,并未完全将数字孪生纳入管控。数字主线和数字孪生之间存在共生关系,以正确的方式将它们连接起来可以放大双方各自的优势。数字主线开始从原先复杂产品的设计与服务阶段向生产制造阶段延伸,并为数字孪生提供访问、整合和转换能力,实现贯穿复杂产品运行概念、解决方案和研制全寿命周期业务过程的数字空间和物理空间信息双向共享/交互和全面追溯。

后续数字主线将与数字孪生同步规划,形成面向数字工程的新型框架。数字主线会通过连接产品全生命周期的数据,为数字孪生提供完整、一致的数据。各部门建立的不同层级数字孪生技术相关数据、软件、传感器和虚拟模型的互联互通,需要由产生实际产品的数字主线来驱动。

数字主线在执行业务流程中的特定步骤时,需要访问数字孪生中的正确定义。以利益相关方发起的工程变更订单为例,此过程可以自动通知相关设计工程师探索替代方案,并通知分析师研究更改对需求的影响。这种连接过程带来了更高效的产品开发执行方式。由于数字定义为他们提供了准确、最

新的信息,利益相关方可以做出更快、更好的决策。

此外,当数字主线被集成到数字孪生过程中,利益相关方可以直接从用户追踪设计变更到工程团队,再到生产现场。使用数字主线不仅可以在多条信息之间追踪线索,还可以改进数字孪生,使工程团队能够获得实时的用户输入,并模拟这些输入将如何影响产品的设计。

5.2 加速敏捷迭代优化的模型体系

首先,数字主线需要最大程度地覆盖工程全部模型。模型广度是系统信息与知识迭代全面性的保证,若数字主线中包含的模型广度不够,则模型化支撑的系统认知范围较窄,其他非模型化工作领域认知就难以整合进来,载人月球探测工程信息与知识迭代的全面性就得不到保证。另一方面,模型的广度也决定了能够基于模型开展的系统工程验证回路的长短,模型覆盖范围越大,对方案提前验证的支持能力越强。

其次,数字主线需要构建体系与系统层面的代理模型交互优化。航天器产品模型的几何主模型源代码通常十分复杂和庞大,不利于传输和使用。部件和装配件的几何主模型源代码可以自动转换为一个轻量级文件,帮助用户、项目人员和供应商便捷获取产品三维可视化信息和精确几何外形信息。几何主模型转换过程中可以及时开展自动验证工作,以确保衍生模型与主模型的匹配一致性,辅助设计评审并增强没有模型3D注释公差经验供应商的研制能力。

最后,MBSE模型直接考虑用户需求,与新一代PLM平台和三维模型管理相集成,针对航天器可能的任务和配置构建唯一的时间线,明确所有功能模块在各时间点的工作要求,实现对可能出现问题的快速追溯,并及时分析决策,针对任务变更进行响应,确保最终产品符合用户需求。

5.3 动静结合的全程全量数据接入

近两年,ChatGPT、DeepSeek等大模型横空出世,以GPU算力为代表的硬件能力也在飞速提升,为数字主线发展数据处理、知识挖掘、智能决策等增值服务奠定了基础。数字主线以现有可信数据关系为基础,在工程全程全量数据中挖掘、表示和积累相关模型和知识,结合数字孪生技术,逐步形成具有感知、认知、预知、决策和优化能力的数智空间,使航天器能够面向动态环境和频繁多变的业务

需求,实现智能决策或决策辅助。

在业务深化应用方面,后续工程级决策及评审必须将所有系统放在完整互联的数字模型体系中进行综合性分析验证,数据和过程复杂性远超管理人员可预知和处理的范畴。数字主线需加强数据对接能力,从设计阶段延伸至制造、试验、发射、运维等阶段,将多领域、多物理、多层级的工程标准、需求数据、设计数据、制造数据、试验数据、供应链数据、使用数据等进行综合集成,基于底层数据及工程知识对成本、进度、性能、经济可承受性、风险以及风险缓解策略等进行分析,支撑工程总体和任务总体及时发现问题、定位原因、优化处理。数字主线生态系统除静态关系数据外,还将允许多物理量(力、热、电、磁、结构、推进、控制)的联合仿真分析,形成详细的动态模型数据,支撑多方案快速论证、性能边界快速验证,避免大规模、多层级、多专业设计评审及摸底试验,推进全级次、全过程的数据治理与应用,发挥出上下文背景数据的价值。

5.4 开放式全自动软件工具对接能力

在美军数字工程实践中,美国国防部持续投入并增强以计算研究与工程采办工具和环境(CREATE)、工程弹性系统(ERS)等为核心的数字工程基础支撑环境;并进一步按照业务需求,研发、集成了设计环境、特性分析工具、快速验证环境等十几种软件工具。每款工具都受数字主线的驱动,能根据过程标准和数据规范进行自动解析、配置、抓取、分析、优化迭代。如果不能最大限度地减少设计师输入数据及其对应元数据的工作量,服务工程团队数字主线的实施、维护和效用就会因设计师缺乏参与而受到影响。因此,未来数字主线的建设应该始终将自动化放在首位。后续载人月球探测航天器研制团队需探索开放式全自动软件工具对接能力,将航天器研制过程的知识、经验、结果等规范化、结构化,进而建立以专业及知识模型为核心的自主数字主线平台和配套软件工具体系。

6 结 论

载人月球探测工程是一项复杂的系统工程,在基于模型的系统工程方法指导下,在数字主线中构建出工程唯一真相源,可在虚拟世界中通过建模与仿真进行不同学科性能的验证、设计迭代和综合优化。以航天器系统、分系统、单机各个层级的科研

生产过程为主线,逐层展开工作并拓展至各相关管理领域,最终迈入航天器研制和运维的数字工程时代,加速数据和模型驱动航天器全寿命周期的业务,以最小的经济成本和时间代价确保最终交付的复杂系统更好地满足用户的复杂要求,促进航天行业的数字化转型。

参 考 文 献

- [1] SINGH V, WILLCOX K E. Engineering design with digital thread[J]. AIAA Journal, 2018, 56(11): 4515-4528.
- [2] 王树博, 杜斌, 姜百汇. 美军数字工程的战略实施及当前能力分析[J]. 战术导弹技术, 2023(6): 22-26, 46.
WANG Shubo, DU Bin, JIANG Baihui. Analysis of the US Army's digital engineering strategy and formed capability[J]. Tactical Missile Technology, 2023(6): 22-26, 46.
- [3] 温泉, 孙巍. 美国国防部计算研究和工程采办工具及环境计划分析[J]. 航空动力, 2022(6): 25-29.
WEN Quan, SUN Wei. Program review of U. S. department of defense's CREATE program[J]. Aerospace Power, 2022(6): 25-29.
- [4] 陈建伟, 杨春雷, 杨亮, 等. 美军数字工程最新进展及趋势分析研究[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2023(1): 153-156.
CHEN Jianwei, YANG Chunlei, YANG Liang, et al. Research on the latest progress and trend of US military digital engineering[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(1): 153-156.
- [5] 王巍巍, 许多. 数字工程的关键技术: 数字线索[J]. 航空动力, 2024(6): 67-71.
WANG Weiwei, XU Duo. The key technology of digital engineering: Digital thread[J]. Aerospace Power, 2024(6): 67-71.
- [6] AIAA Digital Engineering integration committee. digital thread: definition, value, and reference model[R]. Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [7] PETERSON T, SCHINDEL B. Explicating system value through first principles: Re-uniting decision analysis with systems engineering[J]. INSIGHT, 2024, 27(4): 25-32.
- [8] GERY E. Digital Threads-benefits, challenges, and best practices[C]. Oceania Systems Engineering Conference (AOSEC) 2023, Bangalore, India, October 11-14, 2023.
- [9] 任璐英, 张海峰, 王庆国, 等. 数字主线与数字孪生技术发展及在复杂产品研制中的应用[J]. 国防科技, 2023, 44(2): 75-81.
REN Luying, ZHANG Haifeng, WANG Qingguo, et al. Development of digital thread and Digital Twin technologies and their applications in complex product development[J]. National Defense Technology, 2023, 44(2): 75-81.
- [10] 周军华, 薛俊杰, 李鹤宇, 等. 关于武器系统数字孪生的若干思考[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 539-552.

- ZHOU Junhua, XUE Junjie, LI Heyu, et al. Thinking on digital twin for weapon system[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(4): 539–552.
- [11] 王焱, 王湘念, 王晓丽, 等. 智能生产系统构建方法及其关键技术研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(S1): 16–24.
- WANG Yan, WANG Xiangnian, WANG Xiaoli, et al. Research on the structure and key-technology of intelligent manufacturing system[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(S1): 16–24.
- [12] 刘婷, 张建超. 数字主线应用于航空发动机的初步探讨[J]. *航空动力*, 2021(2): 30–34.
- LIU Ting, ZHANG Jianchao. Preliminary discussion on application of digital thread to aero engine[J]. *Aerospace Power*, 2021(2): 30–34.
- [13] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1925–1936.
- GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibao, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1925–1936.
- [14] 孙培文. 基于数字主线的变电站作业流程监管应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- SUN Peiwen. Application research on substation operation process supervision based on digital thread[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [15] 耿建光, 李大林. 支持数字线索的产品数字空间管理框架研究与应用[J]. *现代制造工程*, 2022(2): 31–36.
- GENG Jianguang, LI Dalin. Research and application on product digital space management framework to support digital thread[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022(2): 31–36.
- [16] 朱迪, 张博闻, 程雅琪, 等. 知识赋能的新一代信息系统研究现状、发展与挑战[J]. *软件学报*, 2023, 34(10): 4439–4462.
- ZHU Di, ZHANG Bowen, CHENG Yaqi, et al. Survey on knowledge enabled new generation information systems[J]. *Journal of Software*, 2023, 34(10): 4439–4462.
- [17] 王国庆, 熊焕, 侯俊杰. 数字时代的航天系统工程[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(14): 206–214.
- WANG Guoqing, XIONG Huan, HOU Junjie. China aerospace systems engineering method in the digital age[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(14): 206–214.
- [18] 戴璐, 邵一夫, 郭宇元, 等. 基于数字孪生的卫星装备智能设计系统[J]. *兵工学报*, 2022, 43(S2): 139–145.
- DAI Lu, SHAO Yifu, GUO Yuyuan, et al. Intelligent design system of satellite equipment based on digital twins[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(S2): 139–145.
- [19] “工业软件”重点专项. “高性能制造技术与重大装备”重点专项2024年度项目申报指南[R]. 北京, 中国: 工业和信息化部, 2024.
- “Industry Software” Key Special Project. 2024 project guidelines for the high-performance manufacturing technology and major equipment key Special project[R]. Beijing, China: Ministry of Industry and Information Technology, 2024.
- [20] 张海联. 载人月球探测整体性能提升总体技术[J]. *宇航学报*, 2023, 44(9): 1267–1279.
- ZHANG Hailian. Systems engineering technology for overall performance improvement of manned lunar exploration[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(9): 1267–1279.
- [21] 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): 023967.
- ZHANG Bainan, QI Faren, XING Tao, et al. Model based development method of manned spacecraft: Research and practice[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(7): 023967.
- [22] 叶东明, 秦政, 彭祺攀. 基于模型的载人月球探测任务分析视图构建方法[J]. *上海航天(中英文)*, 2025, 42(2): 28–40, 57.
- YE Dongming, QIN Zheng, PENG Qibo. Model-based method for constructing mission analysis views of manned lunar exploration[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2025, 42(2): 28–40, 57.
- [23] 彭坤, 韩冬, 刘霞, 等. 基于SysML和Modelica的载人月球探测航天器总体设计与仿真验证[J]. *宇航学报*, 2023, 44(9): 1460–1470.
- PENG Kun, HAN Dong, LIU Xia, et al. System design and simulation verification of manned lunar exploration spacecraft based on SysML and modelica[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(9): 1460–1470.
- [24] DOVE R, SCHINDEL B. Agile systems engineering life cycle model for mixed discipline engineering[J]. *INCOSE International Symposium*, 2019, 29(1): 86–104.
- [25] WILSON G, NEWCAMP J. An evaluation of the boeing diamond process model's effectiveness for T-7A red hawk development[J]. *INCOSE International Symposium*, 2023, 33(1): 883–894.
- 作者简介:
魏 平(1984-),男,高级工程师,主要从事数字化技术在航天器研制过程中的应用研究。
通信地址:北京市5142信箱369分箱(100094)
E-mail: weiping939@163.com
- 袁 蕊(1983-),女,工程师,主要从事数字化技术在航天器研制过程中的应用方面的研究。
通信地址:北京市5142信箱369分箱(100094)
- 范松涛(1974-),男,研究员,主要从事航天器制导、导航与控制、电子信息、MBSE等方面的研究。
通信地址:北京市5142信箱369分箱(100094)
- 魏政哲(1986-),男,高级工程师,主要从事基于模型的系统工程、数字工程等方面的研究。
电话:(021)67601028
E-mail: zhengzhe.wei@atoz.com.cn