

控制与决策

Control and Decision

面向复杂产品研制的MBSE体系架构及其发展趋势研究

王文跃, 侯俊杰, 毛寅轩, 靳捷, 卢志昂

引用本文:

王文跃, 侯俊杰, 毛寅轩, 靳捷, 卢志昂. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1354>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述](#)

Review of large power grid vulnerability based on complex network theory

控制与决策. 2022, 37(4): 782–798 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0126>

[多智能体系统的事件触发无模型迭代学习双向一致性](#)

Event-triggered model-free adaptive iterative learning bipartite consensus control for multi-agent systems

控制与决策. 2022, 37(10): 2552–2558 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0401>

[考虑供应商技术截断的“主-供”合作机制演化博弈分析](#)

Evolutionary game analysis of “main manufacturer–supplier” collaboration mechanism considering supplier's technology truncation

控制与决策. 2021, 36(10): 2547–2552 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1678>

[面向人机物三元数据的热轧调度问题研究](#)

Research on hot rolling scheduling problem oriented to human–cyber–physical data

控制与决策. 2021, 36(11): 2825–2831 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0551>

[基于马尔可夫过程的多部件系统劣化状态空间划分模型](#)

Multi-component system state space partition model based on Markov process

控制与决策. 2021, 36(2): 418–428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0480>

面向复杂产品研制的MBSE体系架构及其发展趋势研究

王文跃[†], 侯俊杰, 毛寅轩, 靳捷, 卢志昂

(中国航天系统科学与工程研究院 系统工程研究所, 北京 100037)

摘要: 基于模型的系统工程(model based systems engineering, MBSE)是一种将系统工程理论与数字化技术相结合的复杂产品研制技术,能够以系统工程思维有效驱动复杂产品研制流程,并以系统模型方式形式化地表达系统复杂交互作用. 对此,首先以复杂产品研制背景、MBSE国内外发展状况为理论基础,总结并介绍目前MBSE在复杂产品研制过程中存在的问题;其次,以MBSE模型域、技术域、功能域、跨域支撑要素和应用域为研究层面,结合人工智能、数字孪生、数字主线等数字化技术综合考虑MBSE工程实践所需的关键要素,提出一种面向复杂产品研制的MBSE体系架构并进行详细论述;最后,基于该体系架构研判目前MBSE发展形势,并以数据模型为核心生产要素的角度进一步探讨未来MBSE的发展趋势.

关键词: 基于模型的系统工程(MBSE); 数字化技术; 复杂产品研制; 体系架构; 系统模型

中图分类号: N945

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1354

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 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.

MBSE architecture for complex product development and trends

WANG Wen-yue[†], HOU Jun-jie, MAO Yin-xuan, JIN Jie, LU Zhi-ang

(Institute of Systems Engineering, China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100037, China)

Abstract: Model based systems engineering (MBSE) is a complex product development technology combining systems engineering theory with digital technology, which can effectively drive the development process of complex products and formalize the complex interaction of systems with systems engineering thinking. Firstly, based on the background of complex product development and MBSE development status at home and abroad, this paper summarizes and introduces the problems of MBSE existing in the development process of complex products. Secondly, an MBSE architecture for complex product development is proposed and discussed in detail, taking MBSE model domain, technology domain, function domain, cross-domain supporting factors, and application domain as the research level, combining with artificial intelligence, digital twin, digital thread, and other digital technologies to comprehensively consider the key elements required by MBSE engineering practice. Finally, based on the architecture, the current development situation of MBSE is analyzed, and the future development trend of MBSE is further discussed from the perspective of the data model as the core production factor.

Keywords: model based systems engineering (MBSE); digital technology; complex product development; architecture; system model

0 引言

21世纪以来,数字化技术的迅猛发展极大增加了各种工程系统的复杂程度,数字化技术与系统工程的深度融合促使数据模型逐渐取代文档而成为主要信息载体,复杂工程系统技术体系及其研制环境正发生重大变化^[1-2]. 纵观航空航天、船舶等军工领域,

其产品系统已呈现出功能高度复杂、各领域耦合关联、可重构等诸多特点,不同领域子系统间将产生不可预测的功能耦合、交叠甚至冲突,原本功能良好的子系统可能产生不可预测的行为^[3]. 相比于一般产品研制,复杂产品研制过程往往是通过迭代、渐进的方式逐步开展的,综合结构、电气、控制和机械等诸多领

收稿日期: 2021-08-03; 录用日期: 2021-11-26.

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018203A001, JCKY2018204B010).

责任编辑: 刘士新.

[†]通讯作者. E-mail: 13821692051@163.com.

域研究成果,跨越需求管理、配置管理、质量管理、变更管理等多个工程领域^[4].同时,领域工程师通常使用各种先进的专业工具来分析和设计系统,但这些工具的研发往往是领域业务驱动以解决特定领域存在的问题,领域工具间的数据和工作流彼此割裂,导致很难在产品的全生命周期内实现数据共享和一致的工作流.

在复杂产品研制需求和系统工程理论发展的推动下,以系统工程理论及软件工程经验为基础^[5-8],国际系统工程学会(INCOSE)于2007年正式提出了基于模型的系统工程(MBSE)概念,从模型化和全生命周期的角度,支持概念设计、需求分析、综合设计、验证和确认等系统工程活动^[9].随着国外国防军工企业、政府和科研机构,如达索、洛马、波音、美国国家航空航天局(NASA)、欧空局(ESA)等,对MBSE在航空航天等领域不断地应用探索、项目预研、工程试点,逐步实现了从基于文档转向基于模型、从信息孤岛转向权威信息源、以需求驱动系统逻辑架构设计、全生命周期需求可追溯以及跨领域集成仿真等先进研制模式^[10-12].近年来,MBSE以系统模型方式与数字化技术深度融合,通过更多的“控制”来减少系统的不确定性行为,能够重新达到与现代复杂工程系统的协调匹配状态^[13].如美国国防部(DoD)发布的《数字工程战略》^[14],以推进DoD数字化转型为目标,指出数字工程是数字化版本的MBSE;随着MBSE标准化工作的持续开展以及波音MBE钻石模型等方法的提出^[10,15-17],预示着MBSE与数字主线、数字孪生等数字化技术的进一步融合.

国内,MBSE起步较晚且主要集中于航空航天领域的应用,同时面向复杂产品研制过程,往往不同院所的聚焦点不同,针对MBSE方法的理解程度也存在一定的差异.近年来,中国商用飞机、中国航空工业成都飞机工业、中国航空工业第一飞机设计研究院等航空单位及上海航天技术研究院、中国空间技术研究院、中国航天科工集团第二研究院等航天院所,在新型号自主创新的驱动下,开始在系统设计、建模仿真、平台集成等方面推进并开展MBSE工程实践^[18-20].据悉,在以中国空间技术研究院为代表的航天器MBSE项目应用中,仍存在传统设计流程与MBSE流程“两条线”、设计人员理解不一致、需求可追溯性不强、系统模型间关联性较差等实际工程问题.因此,面向复杂产品研制,如何通过MBSE有效地解决模型信息的整合、模型间的关联追溯、全生命周期贯通等关键性问题,仍然是国内外各工程领域专家所关注的焦点.

本文从MBSE模型域、技术域、功能域、应用域及跨域实践要素等角度出发,结合复杂产品研制流程,分析并论证与MBSE相关的关键技术要素、研制模式、领域应用情况等,并以数字化技术为契机,进一步探究面向复杂产品研制的MBSE体系架构的未来协同发展趋势.

1 面向复杂产品研制的MBSE体系架构

面向具有复杂层级关系的产品系统,MBSE体系架构需要考虑横向关联、纵向集成及全生命周期关联追溯的必要性,旨在涵盖从需求分析、功能分析、

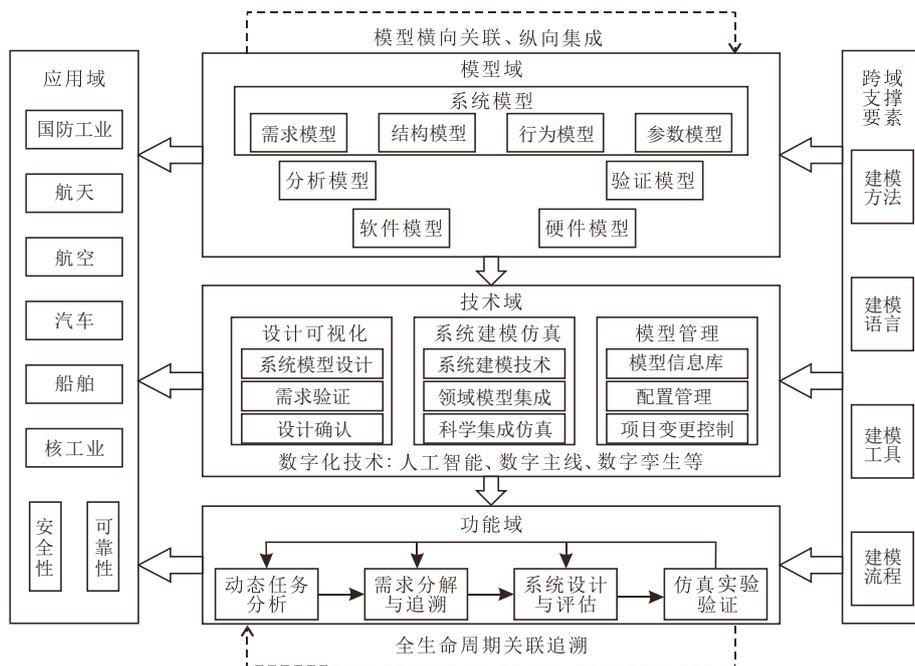


图1 面向复杂产品研制的MBSE体系架构

架构设计到物理架构的反馈优化,以及后续全生命周期的闭环迭代过程.以模型域系统模型为信息载体、技术域为切入点、功能域体现研制模式、应用域拓展MBSE工程应用,并以跨域支撑要素为媒介,提出一种面向复杂产品研制的MBSE体系架构,从不同视角对复杂产品系统进行逻辑性描述、动态执行分析,如图1所示.

1.1 模型域

模型域以共享的系统模型为中心,其余的特定学科模型以严格的数学形式提供各自的特征参数信息并与系统模型进行信息集成,同时所有学科模型都能从不同视角访问一个完整、一致的系统模型所提供的权威信息源.

系统模型涵盖需求模型、结构模型、行为模型和参数模型.需求模型强调用户需求的层次关系、需求间的追溯关系及设计对需求的满足情况等;结构模型对系统层级间以及同一层级系统间的关联关系进行建模;行为模型主要针对基于功能和基于状态的行为进行建模;参数模型则主要强调系统或系统内部组件间的约束关系.特定学科模型一般包括分析模型、验证模型、硬件模型和软件模型.分析模型强调系统性能的特定方面需要与结构模型保持一致,并且支持基于数值的计算或仿真,以通过分析、确认和优化减少风险,解决系统安全性、可靠性、成本等问题^[21];验证模型关注于系统集成信息仿真验证,用于连接系统模型和传统模型,如PLM、CAD/CAE、可靠性等模型,并通过专业特征参数与系统参数的仿真验证对物理系统进行测试和确认^[22];同时,为了更好地连接系统分析/设计模型与工程仿真/验证模型,描述一个复杂系统还需要相应的硬件模型和软件模型得以支撑,同时生成软硬件组件规范等以进行约束指导.

为确保对复杂产品研制功能准确而全面地描述,模型域对系统建模技术有着强烈的需求,并且所涉及工程学科的研发过程和所使用的工具也需要具有较强的集成能力.横向来看,系统模型是系统建模语言做出的系统说明与专业工具做出的专业分析说明的结合,并从需求、结构、行为、参数方面实现要素关联;纵向来看,系统模型涉及从体系到系统、子系统、组件的不同层级,是总体部门与各子系统部门在设计方案方面的数据和工作流集成.

1.2 技术域

技术域主要从复杂产品研制的MBSE实施流程和系统模型角度分析,以模型域系统模型信息为基

础,涵盖系统模型集成过程中所需的技术点,并以系统建模技术为基础、数字化技术为支撑,着重体现于设计可视化、系统建模仿真、模型管理等技术层面.

1.2.1 设计可视化

设计可视化技术主要从系统模型设计、需求验证、设计确认等方面体现.系统模型设计通过模型化方法形式化产品研发活动,同时覆盖从体系到组件的概念设计、需求分析、系统设计、生产制造及运维保障的跨生命周期支持的多个建模领域^[23],以严谨且精准的模型信息、团队间的协作交流及模型复杂度的有效管理实现产品研制质量和生产力的提高,同时降低系统设计带来的风险.

以利益相关者数据和系统工程信息(流程活动、周期等)为系统设计流程输入,提供系统初样设计、详细设计和分析能力,以提升系统决策能力;同时,设计可视化提供一种需求模型验证机制以验证需求是在设计中实现的,允许利益相关者验证并确认系统执行了预期的功能.

1.2.2 系统建模仿真

系统建模仿真技术强调系统建模技术、领域模型集成、学科集成仿真等方面.一方面,系统建模仿真可以有效地将以SysML形式化系统工程活动后的系统模型与工程分析和仿真实验模型相关联,例如NX、Simulink、Matlab、AnyLogic等模型.同时,系统模型支持基于模型信息库捕获系统各部分间关系,从而作为物理系统集成分析的信息载体.基于跨领域系统模型的模型化程度能精确地反映实体的真实状态和行为,解决传统领域分系统之间存在的弱耦合关系,充分发挥未来MBSE在学科信息集成方面的潜力.

另一方面,学科工程师通常采用Modelica、STK等来解决学科集成仿真问题^[24],并通过继承、修改等方式形成具有知识产权的系统模型甚至模型库.其中,将SysML系统架构模型转换成Modelica物理架构模型主要包括基于XMI对象映射的仿真模型框架生成技术和基于交互式的原理模型封装技术^[25]等.基于SysML集成的跨领域模型能够有效地结构化系统设计工作,半自动化地生成设计与分析间关系的分析模型、基于XML的分析模型结构和基于Java的仿真模型等,用于有效地分析并验证系统功能、行为、结构、信息流、交互关系等信息对系统的满足情况^[26].

1.2.3 模型管理

模型管理技术聚焦于模型信息库、配置管理和项目变更控制等方面.模型信息库旨在自动化贯穿

产品研制生命周期的系统模型与其他学科模型的集成活动,包含模型域系统模型提供的自身特征信息以及系统模型和分析/验证模型间的分析规范、测试计划说明等信息.同时,该信息库除了提供日常的工程数据之外,还将包含自动生成的可交付物规范,以支撑模型全生命周期关联可追溯流程.

配置管理主要用于配置受控配置项的集合,在与数字主线、数字孪生等技术融合的MBSE活动中,主要用于管理数字系统模型及后期产品数字孪生体等.因此,配置管理是数字化研制中的关键,只有确保MBSE、数字主线、数字孪生等过程使用的技术和工具等达到可用性水平时,配置管理才能取得良好成效.项目变更控制则通过获取和评估变更请求、变更实施、变更评审、变更合并和基线重定等流程支撑项目需求变更问题.

数字化技术在设计可视化、系统建模仿真及模型管理过程中起着重要作用.一方面,基于人工智能算法,能够将复杂产品研制过程中的人、事、知串联起来,精准匹配,实现基于人、基于事进行知识的精准推动流程,促进MBSE规范化流程中数据信息的准确传递过程^[27],确保设计可视化、建模仿真参数传递等及

时可靠;另一方面,从系统生命周期的角度,MBSE可以作为数字主线的起点,使用从物联网收集的数据,运行系统仿真来探索故障模式,从而随着时间的推移逐步改进系统设计^[28].同时,数字主线提供的数字连接与数字孪生提供的可信数据和知识的结合,可以加速MBSE中系统工程过程的转换^[29].

1.3 功能域

面向复杂产品研制过程,以模型域系统模型为信息载体,技术域系统建模仿真、模型管理等为技术支持,功能域从基于模型的动态任务分析到需求分解与追溯、系统设计与评估,再到仿真实验验证并形成迭代反馈,不断优化,基于所需功能技术点体现不同阶段系统模型的价值.

1.3.1 基于模型的动态任务分析

基于模型的动态任务分析以产品在某一系统场景中的使用方式为背景,以不同用户需求为输入,明确系统需求为目标,按照任务运行流程开展从任务级模型到系统级模型的构建,明确任务要素与系统参数的耦合关系,通过任务分析模型的动态仿真执行,能够迅速得到参数变更对任务效能的影响状况,支撑可行性论证与总体方案权衡分析过程^[30],见图2.

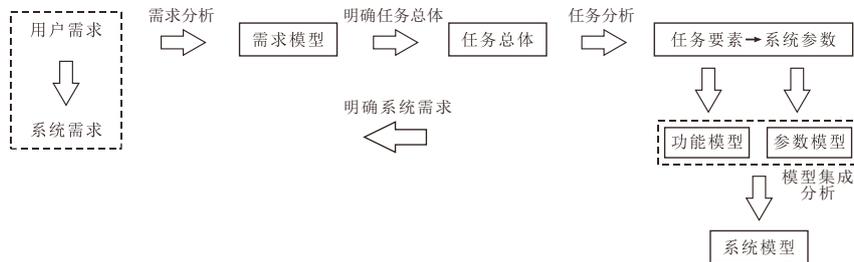


图2 基于模型的动态任务分析

1.3.2 基于模型的需求分解与追溯

复杂产品研制通常涉及多个强耦合学科,产品系统顶层需求分解难度大,难以保证需求体系的完整性和分解结果的全局优化.基于模型的需求分解与追溯,如图3所示(以航天器产品为例),从顶层需求开始逐层级构建需求模型,随着顶层需求、系统需求、子系统需求到组件需求的生成,后续系统设计产生的功能与架构定义通过模型逐层开展需求追溯分析^[31],并通过功能点与物理系统对需求的满足来验证系统设计对需求的响应程度,其中虚线箭头代表需求分解路径,提供可追溯性.

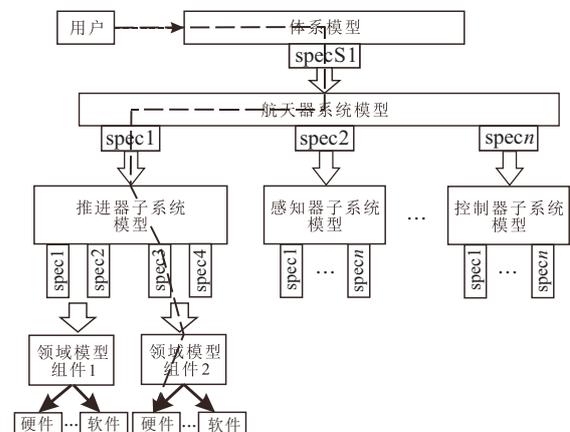


图3 基于模型的需求分解与追溯

1.3.3 基于模型的系统设计与评估

目前,复杂工程系统高度综合化的发展使得系统设计与评估面临协同研发受阻、信息理解存在分歧、

数据传递存在断点等挑战^[32].基于模型的系统设计与评估能够从系统模型角度实现整个产品系统的需

求、结构、行为、参数及相互关系的统一描述,产品系统研制流程与MBSE研制流程的深度融合,全过程关联的结构化模型知识积淀重用,模型数据在各专业建

模工具间的流转与集成,并综合权衡指标进行整体系统评估,如图4所示。

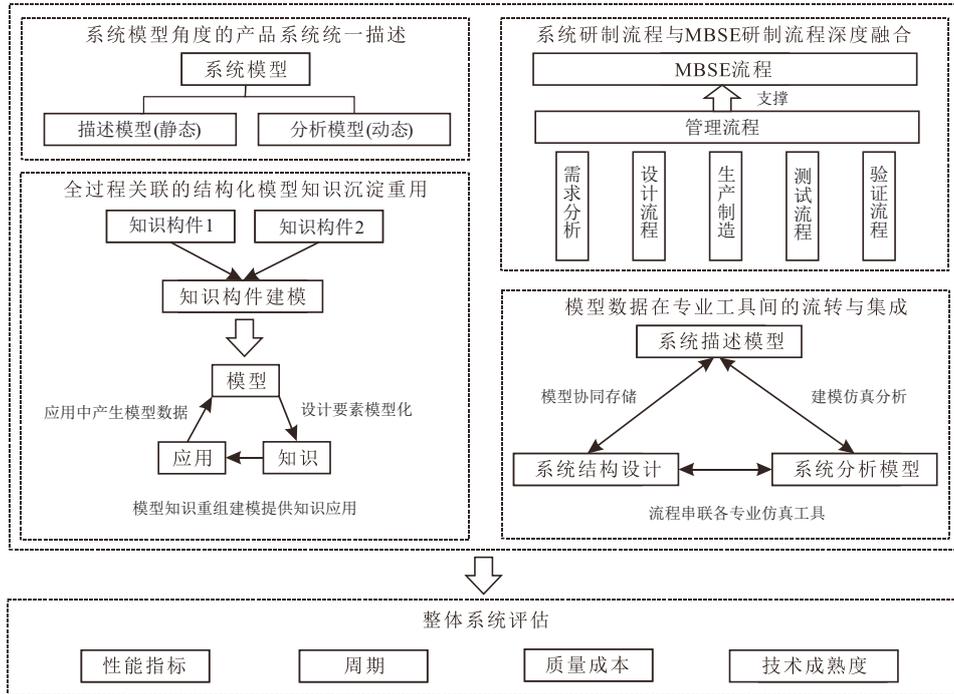


图4 基于模型的系统设计与评估

1.3.4 基于模型的仿真实验验证

MBSE所构建的系统模型提供完整的输入数据信息,基于模型的仿真实验验证则是在系统模型的基础上能够基本正确地反映物理世界的特性和参数^[33]。通过模型降阶技术、标准封装流程与规范,将各类专业模型、有限元仿真模型进行有效集成,构建集成多学科的系统功能模型和系统架构模型^[34],基于多方案架构权衡、方案参数优化、分系统实验验证等实现基于模型的仿真实验验证过程,并将仿真实验数据不断反馈以进行系统验证确认,如图5所示。

1.3.5 模型全生命周期关联追溯

功能域还需要为复杂产品研制提供一个独特的模型驱动的系统工程工作环境,能够将系统工程与产品全生命周期管理融为一体,为跨领域、跨部门的复杂产品研制提供统一的信息化中枢^[35]。集成化、结构化的需求管理环境可在整个生命周期内传达需求,将需求与功能、逻辑、物理相关联,将需求与变更管理、配置管理、版本管理相关联,需求管理将随着PLM应用的扩展而推进,借助生命周期管理对需求进行全生命周期的跟踪^[36]。基于此,集成环境还可以验证指标和行为的可行性,结构化需求传递至CAD中成为产品设计的需求源,并通过数字孪生、数字主线等技术实现模型的全生命周期追溯关系,建立权威真相源,支持复杂工程系统的变更管理和快速迭代设计^[3]。模型的全生命周期关联追溯,可以让系统开发中各利益相关者充分地发掘基于模型研发方式的优势,从根本上加速MBSE正向研发和反向设计能力的进程。

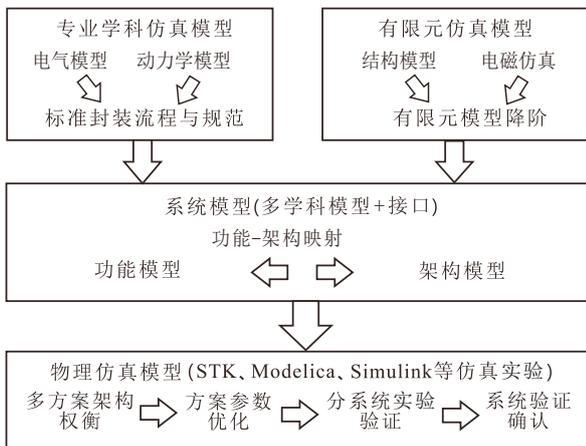


图5 基于模型的仿真实验验证

1.4 跨域支撑要素

面向复杂产品研制的MBSE体系架构的模型域、技术域、功能域间的协同交互离不开跨域支撑要素:建模方法、建模语言、建模工具、建模流程等,能够从一定程度上实现异构模型间通信。

1.4.1 基于系统建模语言规范建模规则

建模语言用于定义采用具体术语描述模型的标准语法和语义规则。INCOSE 和 OMG 为了支持 MBSE 的实施并有效实现跨领域模型集成过程,在 UML 2.0 的基础上正式提出了系统建模语言 SysML^[9]。目前,MBSE 实践者通常会使用 SysML 来构建系统模型,并且在图形化建模语言的基础上,使用一系列标识法在模型中显示元素及其关联关系。经过 10 多年的实践探索,基于 SysML 的设计模型已被证明对正式的信息和知识捕获非常有用^[37-38]。

然而, SysML 在描述复杂工程系统的物理世界时仍发力不足,如存在较为松散的语义等问题^[39]。因此,在 OMG 最新发布的 SysML 2.0 征求建议书中,从系统工程角度采用敏捷协作方法进行开发,旨在建立一种适合系统工程描述物理世界的建模语言^[40-41]。SysML 2.0 向以语义为主的规范模式改进,以实现 MBSE 的形式化表达和系统要素的模型化描述,从而构建并可视化具有良好形式的系统模型。同时,基于 SysML 2.0 构建的系统模型将呈现全面性、通用性、交互性、实体化趋势,能够有效地梳理并约束物理实体间的关系。

1.4.2 利用 MBSE 建模工具实现系统建模

目前,主流的 MBSE 建模工具包括 No Magic MagicDraw、IBM Rhapsody、EA 和 Thales Capella 等^[42]。通过建模工具构建的模型能够展示一系列系统元素及元素间关系,并拥有一系列图作为底层模型视图,实现系统模型的构建过程。同时,当在建模工具中修改图中元素时,实际上是在底层模型中修改元素本身,能够立即更新与该元素相关联的图与模型。大部分 MBSE 建模工具均兼容 XMI 元数据交换和 AP233 标准,以支持工具间的模型与数据交换,从而以模块化方式开发解决系统工程数据的广度问题^[9]。

1.4.3 通过建模方法和建模流程指导约束建模过程

MBSE 方法论一般是指建模方法与建模流程的结合,并以建模语言和建模工具作为支撑手段,共同指导、约束、形式化建模过程^[8]。目前主流的 MBSE 方法论有:以 SysML 为基础建模标准的 Harmony-SE、OOSEM、SYSMOD^[43] 和 MagicGrid^[44] 等;以自定义模型为基础的 Arcadia^[45] 等;其他维度的包括 OPM、JPL SA 和 Vitch MBSE 等^[8]。以上方法论都能从不同角度捕获建模活动中的基本要素并实施建模过程,包括需求、功能、架构和物理等层面,并广泛分布于系统工程全生命周期阶段。

针对具体工程任务,MBSE 方法论所规定的步骤并非完全适用,需要进行定制创新以满足项目的针对性需求。2016 年, No Magic 公司充分借鉴 BT SysMM^[46] 和 KDA 系统架构框架^[47] 分别在交通和国防工业的专业实践经验,针对自身特点创新性地提出了 MagicGrid 方法论并由达索公司不断深化与发展^[44]。2021 年, MagicGrid 进行了更新升级,将之前行为与结构支柱的位置对调以便更适应建模流程;同时添加了安全性和可靠性这一全新支柱。泰雷兹公司经过多年 MBSE 实践探索,提出了 Arcadia 方法论并在公司内部拥有广泛应用^[45]。Arcadia 方法论在工程层级活动中主要分为 4 部分:运行分析、系统功能分析、逻辑架构设计、物理架构设计,同时将其在问题域和解决方案域做了明显区分,着重强调连续性工程和并行工程。定制化 MBSE 方法论是表达系统开发、支持全生命周期和系统演化的形式化方式,能够结合制造业特点将与需求、功能、架构等有关的信息全都融入同一个模型,通过实体的不断分解来建立复杂系统的层次模型并管理系统复杂性。

1.5 应用域

面向复杂产品研制流程,以 MBSE 模型域为信息载体、技术域为数字化技术手段、功能域为数字化研制模式、跨域支撑要素为数字化工具和环境,促进跨域协同交互,不断推进 MBSE 在不同应用领域的创新拓展。

1.5.1 MBSE 深化应用领域实践

目前,国内外 MBSE 的领域应用主要由航空航天领域扩展至国防工业、汽车、船舶、核工业等,旨在通过系统模型体现系统工程流程,并贯穿于全生命周期,实现设计一致性与关联可追溯性。

基于现代武器装备系统多层次特点所带来的效能评估成本高、层间效能影响关系模糊等挑战,魏海龙等^[48] 在 MBSE 方法的基础上,将系统建模引入效能评估,构造了模型驱动的系统效能评估方法,通过模型的分析 and 仿真,支持效能数据的获取与计算。针对当前载人航天器研制中仍存在参数化和模型化程度不高、基于模型的系统综合仿真验证不足、研制各环节缺乏数字化集成等问题,张柏楠等^[49] 在引入 MBSE 的基础上,提出了面向载人航天器全生命周期,包含 6 大类模型、3 个闭环验证环节的模型体系,深入探索了各研制环节中不同模型间的传递与关联关系。针对商用航空发动机研制中需求分析与物理模型交互难的问题,张玉金等^[50] 构建了一套面向全生命周期运行场景的 MBSE 设计方法,基于不同维度组

合的场景全面捕获需求,基于可扩展标记语言(XMI)的数据交换格式进行SysML模型与Modelica模型转换技术研究,以实现从需求模型到物理性能模型的转换,并以某型号航空发动机为例进行了联合仿真验证。Ford汽车在多年前即引入MBSE解决方案,通过基于模型的方法实现用户需求、系统设计、系统验证以及功能安全等业务活动的紧密集成和闭环追溯,形成基于SysML的数字化设计方式^[51]。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,通过模型化描述的方式解决了过去复杂系统工程过程中变更管理不易开展的问题。从上述MBSE领域应用情况可以看出,尽管目前各领域从一定程度上实现了基于文档向基于模型的转变,但仍存在模型化程度不足、系统模型间关联性不强、可追溯性较弱等问题。

1.5.2 MBSE与系统安全性、可靠性分析的集成

高安全性、高可靠性一直是各军工行业复杂产品研制所追求的重要目标,以故障模式及影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、可靠性框图(RBD)为代表的常规系统安全性和可靠性分析技术已在工程实践中得到了广泛应用^[52]。但随着现代复杂工程系统复杂度的不断提升,集成化、智能化、网络化、软件密集化趋势的不断发展,系统安全性和可靠性面临较大挑战^[53]。一方面,MBSE将为安全性、可靠性分析提供一套严格的技术过程活动,增强安全性、可靠性分析的目的性;另一方面,MBSE将提供一个一致的权威设计数据源,为基于模型的安全性、可靠性分析提供规范化的模型输入,解决前期系统功能模型输入混乱问题,保证安全性、可靠性分析与功能/性能分析的同源。

法国PRISME实验室提出了一种系统工程中集成可靠性分析的方法^[54],通过MBSE与FMEA方法的整合, SysML系统架构了模型与AADL、Simulink等仿真模型间的元素映射关系,构建了一个共享的、可重用的、与具体模型无关的基础数据库,用于支持开展故障建模和仿真。Mhenni等^[55-56]针对机电系统的安全性分析,提出了一套完全基于SysML进行系统安全性分析的方法(SafeSysE),利用XML元数据交换技术,将SysML模型转化为XML文件,以支持开展功能FMEA和组件FMEA;同时基于SysML的故障树生成算法、SysML模型与NuSMV-SA模型的映射算法,支持系统的安全性、可靠性评估与行为仿真分析。值得一提的是,2021年,达索在其最新的MagicGrid方法论中添加的安全性和可靠性支柱,对

于注重安全顶层设计与运行可靠性的核电新堆型正向研发具有十分重要的意义。可以预见,将安全性分析、可靠性分析与制造业MBSE研制流程进行融合集成,也将是未来重点发展方向。

2 未来MBSE发展趋势

2.1 MBSE发展形势研判

通过对面向复杂产品研制的MBSE体系架构的论述分析不难看出,MBSE的发展着重于两个大的方面:1)系统模型是MBSE核心。通过运用模型域、技术域及跨域支撑要素中的关键要素,实现向以系统模型为中心的工程领域研制模式和方法流程的转变,并最终构建以数据为主要信息载体的、可共享的、可重用的权威信息真相源。2)系统模型贯穿全生命周期。对于某一顶层需求,不同的系统设计和子系统设计人员按照专业领域角度承接相应的任务,并需要在进一步捕获和分析具体需求的基础上,构建并输出承上启下、表达无歧义的数据模型,实现不同领域工程师间的协同交互,提供全生命周期系统模型的一致性和可追溯性。

从MBSE自身特点与实际工程结合的角度出发,MBSE系统模型尚未完全实现跨领域的知识共享与协作,需求模型、功能模型、架构模型及物理仿真模型之间的语义互操作性依旧很难实现,原因主要是:不同领域工具间存在数据和工作流割裂的情况;同时,能够提供性能验证和确认并保证设计可追溯性的关键子系统和组件,其用于需求定义和功能流程细化的规范也是非常欠缺的。因此,未来MBSE发展需要着重其系统架构模型各方面要素的规范发展,以数据模型为核心生产要素进行资源重组与结构化,进一步增加模型可解释程度,构建专属于研制单位、企业的数字化集成环境,使得模型贯穿于产品研制的全生命周期过程。

2.2 以数据模型为核心生产要素,构建数字化集成环境

MBSE追求跨领域模型开发的一致性,使得系统模型能够具有清晰的语义基础,精确地定义模型间的关系,并提供系统进一步开发模型的功能。OSLC、SysML 2.0等标准提出的语义建模技术从一定程度上向系统设计与物理系统间信息融合的方向深化,使得系统实现或提供的目标、功能、组件、接口以及质量的数据属性特征,能够由明确的、具有良好定义和语义的领域概念模型元素进行描述。

在以数据模型为核心生产要素所构建的MBSE数字化集成环境中,基于物联网、CPS及AI技术,使计

计算机能够辅助甚至自动设计复杂产品研制的MBSE系统模型,完成从上级需求到系统需求甚至更深层级需求的分解过程,并基于自然语言处理(NLP)技术实现需求元素与SysML要素的映射关系,功能点对需求的分配及满足情况等,最终实现从需求数据到系统需求模型的智能生成过程,并实现信息交互完整的API或标准/自定义的元模型用于系统建模仿真工作;同时,通过XML、JSON、RDF等数据表示语言,Java、Python、C++等数据编程语言以及SOAP、REST等数据通信语言和协议,能够针对特定工具的信息模式(或本体)将具有完全不同任务和功能的分系统通过语义理解后的系统数据模型连接起来,实现系统模型关联交互、异构模型通信等新兴技术.所构建的系统模型作为MBSE的起点,通过数字孪生和数字主线技术的不断作用,使得虚拟的数据模型不断向实体的数字孪生体靠拢,实现虚实交互过程,并贯穿整个系统生命周期.

在此过程中,通过将AI技术与MBSE相结合,充分利用当前和未来AI技术的巨大潜力,使未来的复杂产品研制过程能够适当且及时地处理由数字化产生的不断增长的信息量,并适应不断变化的条件和运行时从数据中获取的知识.为保证所构建模型的准确性,也可通过AI技术检验流程中模型所涉及的机理、约束和控制等属性与真实生产过程中的状态是否保持一致.同时,由数据模型迭代形成的数字孪生体将成为系统全生命周期的单一权威的真相来源;构建好数字孪生体后,进行仿真验证,并将所得结果与实际检验的结果进行比对修正;然后将优化后的输入参数、输出属性赋给相应的数字孪生体,并进行反复迭代优化,使其与真实检验环境相一致.

人工智能算法、数字主线和数字孪生等所形成的数字化集成环境将为系统模型的构建提供可信的数据和知识,加速MBSE中使用的系统工程流程的转换,完成向以系统模型为核心转移的发展趋势,并实现系统模型贯穿全生命周期活动.

3 结语

从系统工程角度看,模型复杂度、精确度和实时性随着产品生命周期的演进逐步提升,MBSE的实现方式依赖于新技术的牵引,系统模型的具体形式也必须符合新技术的需求.面向复杂产品研制过程,MBSE的体系架构将随着模型域、技术域、功能域、应用域以及跨域支撑要素之间的不断交互协同趋于完善,同时伴随以数据为核心生产要素、构建数字化集成环境等未来发展趋势,将有助于重构系统

工程理论和实践,充分发挥MBSE模型优势及跨学科特点.另外,未来MBSE发展将以AI算法为支撑、以数字孪生和数字主线为驱动,贯彻以数据模型为核心生产要素的思想,全面实现MBSE系统模型全生命周期关联追溯.面向未来系统工程领域,构建专属的数字化集成环境并基于适合制造业自身特点及优势的MBSE实施路径将是工业蓬勃发展的必然选择.

参考文献(References)

- [1] Törngren M, Grogan P. How to deal with the complexity of future cyber-physical systems?[J]. *Designs*, 2018, 2(4): 40.
- [2] Ciampa P D, La Rocca G, Nagel B. A MBSE approach to MDAO systems for the development of complex products[C]. *AIAA Aviation 2020 Forum*. Reston, 2020: 3150.
- [3] 梁乃明, 方志刚, 李荣跃, 等. 数字孪生实战: 基于模型的数字化企业(MBE)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 42-56.
(Liang N M, Fang Z G, Li R Y, et al. *Digital twin practice: Model based enterprise (MBE)* [M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2020: 42-56.)
- [4] Gregory J, Berthoud L, Tryfonas T, et al. The long and winding road: MBSE adoption for functional avionics of spacecraft[J]. *Journal of Systems and Software*, 2020, 160: 110453.
- [5] 段海波. 从霍尔模型技术系统的发展进化看传统系统工程到现代系统工程的演变[J]. *智能制造*, 2016(S1): 88-95.
(Duan H B. The evolution from traditional systems engineering to modern systems engineering from the development and evolution of Hall model technology system[J]. *Intelligent Manufacturing*, 2016(S1): 88-95.)
- [6] Dickerson C E, Mavris D. A brief history of models and model based systems engineering and the case for relational orientation[J]. *IEEE Systems Journal*, 2013, 7(4): 581-592.
- [7] Wymore A W. *Model-based systems engineering: An introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricategory theory of system design*[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993: 45-53.
- [8] Estefan J. A survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies[J]. *INCOSE MBSE Focus Group*, 2007, 25(8): 1-12.
- [9] Delligatti L. *SysML distilled: A brief guide to the systems modeling language*[M]. New Jersey: Addison-Wesley Professional, 2013: 1-16.
- [10] 美国国际系统工程协会. 系统工程手册: 系统生命周期流程和活动指南[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 1-5.
(INCOSE. *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*[M]. The 2nd edition. Beijing: China Machine Press, 2017: 1-5.)

- [11] Gough K M, Phojanamongkolkij N. Employing model-based systems engineering (MBSE) on a NASA aeronautic research project: A case study[C]. Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, 2018: 3361.
- [12] Alvarez J L, de Koning H P, Fischer D, et al. Best practices for model based systems engineering in ESA projects[C]. AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Orlando, 2018: 5327.
- [13] Madni A M, Sievers M. Model-based systems engineering: Motivation, current status, and needed advances[M]. Berlin: Springer, 2018: 311-325.
- [14] Zimmerman P. DoD digital engineering strategy[C]. Proceedings of the 20th Annual National Defense Industrial Association (NDIA) Systems Engineering Conference. Waterford: Springfield, 2018: 23-26.
- [15] INCOSE A. A world in motion: Systems engineering vision 2025[M]. San Diego: International Council on Systems Engineering, 2014: 1-30.
- [16] ISO/IEC/IEEE 15288: 2015, Systems and software engineering — System life cycle processes[S].
- [17] SEAL D. The model-based engineering (MBE) diamond — A framework for digital transformation[C]. INCOSE International Workshop 2020. Torrance, 2020: 1-15.
- [18] 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.
(Deng Y C, Mao Y X, Lu Z A, et al. Analysis of the development of model-based systems engineering application[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 49-54.)
- [19] 何强, 刘喜莹. 夯实系统工程基础, 推进MBSE实践[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 22-29.
(He Q, Liu X Y. Tamp the foundation of systems engineering and steadily promot MBSE practice[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 22-29.)
- [20] 陈红涛, 邓昱晨, 袁建华, 等. 基于模型的系统工程的基本原理[J]. 中国航天, 2016(3): 18-23.
(Chen H T, Deng Y C, Yuan J H, et al. Fundamentals of model-based systems engineering[J]. Aerospace China, 2016(3): 18-23.)
- [21] Apostolov H, Fischer M, Olivotti D, et al. Modeling framework for integrated, model-based development of product-service systems[J]. Procedia CIRP, 2018, 73: 9-14.
- [22] Grama S N, Mathur A, Badhe A N. A model-based cooling strategy for motorized spindle to reduce thermal errors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 132: 3-16.
- [23] Chami M, Aleksandraviciene A, Morkevicius A, et al. Towards solving MBSE adoption challenges: The D3 MBSE adoption toolbox[J]. INCOSE International Symposium, 2018, 28(1): 1463-1477.
- [24] Liu Z G, Chen Q, Xia N, et al. An MBSE tool to support architecture design for spacecraft electrical power system[J]. INCOSE International Symposium, 2018, 28(1): 64-78.
- [25] 徐东. 基于FMI协议的跨领域多学科仿真系统建模分析[J]. 电子测试, 2020(8): 34-36.
(Xu D. Modeling and analysis of interdisciplinary and multidisciplinary simulation system based on FMI protocol[J]. Electronic Test, 2020(8): 34-36.)
- [26] Ribeiro F G C, Pereira C E, Rettberg A, et al. Model-based requirements specification of real-time systems with UML, SysML and MARTE[J]. Software & Systems Modeling, 2018, 17(1): 343-361.
- [27] Pohl K, Broy M, Daembkes H, et al. Advanced model-based engineering of embedded systems[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016: 42-53.
- [28] Schluse M, Atorf L, Rossmann J. Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development[C]. Annual IEEE International Systems Conference (SysCon). Montreal, 2017: 1-8.
- [29] Madni A, Madni C, Lucero S. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering[J]. Systems, 2019, 7(1): 7.
- [30] Kaslow D, Soremekun G, Kim H, et al. Integrated model-based systems engineering (MBSE) applied to the Simulation of a CubeSat mission[C]. IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2014: 1-14.
- [31] Lemazurier L, Chapurlat V, Grossetête A. An MBSE approach to pass from requirements to functional architecture[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 7260-7265.
- [32] Masior J, Schneider B, Kürümlüoglu M, et al. Beyond model-based systems engineering towards managing complexity[J]. Procedia CIRP, 2020, 91: 325-329.
- [33] 曹悦, 刘玉生, 赵建军, 等. 基于SysML的复杂机电系统设计模型形式化扩展与验证[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(12): 2166-2176.
(Cao Y, Liu Y S, Zhao J J, et al. Formal extension and verification of system design models for complex mechatronic systems based on SysML[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(12): 2166-2176.)
- [34] Kahlen F J, Flumerfelt S, Alves A. Transdisciplinary perspectives on complex systems[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017: 319-326.
- [35] Konrad C, Jacobs G, Rasor R, et al. Enabling complexity management through merging business process modeling with MBSE[J]. Procedia CIRP, 2019, 84: 451-456.
- [36] Pavalkis S. Towards industrial integration of MBSE into PLM for mission-critical systems[J]. INCOSE International Symposium, 2016, 26(1): 2462-2477.
- [37] Eckl C, Brandstatter M, Stjepandic J. Using the “model-based systems engineering” technique for multidisciplinary system development[C]. The 22nd ISPE International Conference on Concurrent Engineering.

- Delft: IOS Press, 2015: 100-109.
- [38] Mochine P, Sünnetcioglu A, von Dungern O, et al. SysML-modelle maschinell verstehen und verknüpfen[C]. Tag des Systems Engineering. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017: 157-166.
- [39] Broy M, Bhm W, Rumpe B. Advanced systems engineering[M]. Berlin: Springer. 2021: 353-364.
- [40] Friedenthal S. Requirements for the next generation systems modeling language (SysML@v2)[J]. Insight, 2018, 21(1): 21-25.
- [41] Friedenthal S. SysML v2 update[C]. 2021 Annual INCOSE International Workshop. Virtual Event, 2021: 12-24.
- [42] 郭宇, 臧睿, 周璐莎, 等. 基于模型的系统工程在航空发动机控制设计中的应用[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 96-101.
(Guo Y, Zang R, Zhou L S, et al. Application of model-based systems engineering to aero engine control design[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 96-101.)
- [43] Weilkens T. SYSMOD — The systems modeling toolbox-pragmatic MBSE with SysML[M]. Verlag: MBSE4U, 2016: 1-5.
- [44] Morkevicius A, Aleksandraviciene A, Mazeika D, et al. MBSE grid: A simplified SysML-based approach for modeling complex systems[J]. INCOSE International Symposium, 2017, 27(1): 136-150.
- [45] Pascal R. Systems architecture modeling with the ARCADIA method[M]. London: ISTE Press-Elsevier, 2018: 12-23.
- [46] Chami M, Oggier P, Naas O, et al. Real world application of MBSE at bombardier transportation[C]. SWISSED 2015. Kongresshaus Zürich, 2015: 1-7.
- [47] Soegaard S E. MBSE using SysML — Adopting MBSE in the joint strike missile (JSM)[C]. No Magic World Symposium. Allen, 2016: 1-39.
- [48] 魏海龙, 李清, 黄诗晟, 等. 模型驱动的武器装备系统效能评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2019, 59(11): 925-933.
(Wei H L, Li Q, Huang S S, et al. Model-driven MOE method for weapon systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2019, 59(11): 925-933.)
- [49] 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 B N, Qi F R, Xing T, et al. Model based development method of manned spacecraft: Research and practice[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 023967.)
- [50] 张玉金, 黄博, 廖文和. 面向场景的航空发动机基于模型的系统工程设计[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(11): 3093-3102.
(Zhang Y J, Huang B, Liao W H. MBSE unified modeling and design method of commercial aeroengine for operation scenario[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(11): 3093-3102.)
- [51] Post K, Walley G, Che J. Integrating descriptive models with an analytical model culture-lessons learned at Ford[C]. INCOSE 2014 International Workshop. Torrance, 2014: 1-31.
- [52] 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): 523436.
(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): 523436.)
- [53] Biggs G, Juknevičius T, Armonas A, et al. Integrating Safety and Reliability Analysis into MBSE: Overview of the new proposed OMG standard[J]. INCOSE International Symposium, 2018, 28(1): 1322-1336.
- [54] Cressent R, Idasiak V, Kratz F, et al. Mastering safety and reliability in a model based process[C]. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. Lake Buena Vista, 2011: 1-6.
- [55] Mhenni F, Nguyen N, Kadima H, et al. Safety analysis integration in a SysML-based complex system design process[C]. IEEE International Systems Conference (SysCon). Orlando, 2013: 70-75.
- [56] Mhenni F, Choley J Y, Nguyen N, et al. Flight control system modeling with SysML to support validation, qualification and certification[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(3): 453-458.

作者简介

王文跃(1997—), 男, 硕士生, 从事基于模型的系统工程、需求智能建模的研究, E-mail: 13821692051@163.com;

侯俊杰(1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事智能制造、基于模型的系统工程等研究, E-mail: houjj@spacechina.com;

毛寅轩(1988—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事系统工程、体系工程等研究, E-mail: Maoyx21@163.com;

靳捷(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事体系工程、基于模型的系统工程等研究, E-mail: comeon@live.com;

卢志昂(1993—), 男, 工程师, 硕士, 从事基于模型的系统工程等研究, E-mail: 18810446359@163.com.

(责任编辑: 李君玲)