基于 MBSE 的智能生产及运营管控关键技术研究

张小文，褚建国，林付利，闫祎玮，李金峰，李　辉

（中海油田服务股份有限公司，天津 300450）

摘要：当前基于模型的系统工程（Model-Based System Engineering，MBSE）方法在各行业普遍应用，但几乎都局限于设计阶段，在生产制造和运营管理阶段受技术限制仍未完全贯彻。为更好推进完善 MBSE 在产品全生命周期的融合应用，本文将 MBSE 应用于生产及运维环节，研究智能生产模式及运营管控关键技术。本文设计了基于 MBSE 的系统化生产及运营框架，提出了融合系统化生产和系统化检验的智能化生产模式。为进一步完善产品的运营管控策略，详细阐述了数字化交付、数字化运营、数字化维修等关键技术。本文以模型贯彻生产及运营阶段，真正实现基于 MBSE 的产品生产运维管理，提升产品的智能化管控水平。

关键词：基于模型的系统工程；智能生产；运营管控；系统化；数字化

中图分类号：TH391　　**文献标志码：**A

1　引言

随着工业互联网、人工智能、大数据等科学技术的快速发展，全球各行业都掀起了数字化、智能化的潮流[1]。传统工业制造中，设计开发、生产制造与检验测试往往割裂开来，三者之间呈现链式关系，自上而下依次进行，效率低下。且由于三者间信息不流通、沟通存在障碍等导致设计制造的流程协同、数据协同和知识协同面临挑战[2]。为面对复杂系统的工程作业，传统基于文本的系统工程（Text-Based System Engineering，TSE），实现了系统各级间的协同，解决了系统工程的部分难题，但 TES 以文本为基础，天然存在术语间的交流障碍，随着系统的愈发庞大，这个矛盾也愈发尖锐难以解决[3]。

近年来，MBSE 在系统工程领域广受关注，尤其是系统较为复杂、学科融合交叉深入的行业中，例如航空航天领域[4]。MBSE 方法提出后，在 NASA 和波音等均已得到应用，取得了不错的使用效果[5]。MBSE 方法的提出，对工业中的复杂系统工程的发展起了重大作用，尤其在生产与运营管控方面更是全新的突破。

在智能生产方面，MBSE 使得工业生产跳出了原本传统工业生产的时序限制与沟通障碍，避免了 TSE 术语障碍的缺陷，大大提升生产效率、降低试错成本、提高产品质量。2020 年，刘顺涛[5]等根据 MBSE 将飞机大部件智能装配能力的建设需求与技术方案细化明确，构建出相应的数字模型，根据模型进行不断验证、迭代优化，

最终实现智能装配能力效用的最大化。同年，张伯楠[6]等提出了面向载人航天器全生命周期的模型体系，验证了在该模型下设计效率与管理效率均有较大程度的提升。2021 年，葛宇[7]等利用 MBSE 进行小型卫星的敏捷设计制造，在设计生产制造各级间使用统一模型，提高了工程的研制效率。蒋白桦[8]等实现了接受设计端输出的模型数据自动生成三维模型，基于模型进行自动化施工及确认，使得施工更高效，质量更可靠。

在运营管控方面，MBSE 的模型贯穿全生命周期，保证产品数字化交付，使得运营商拥有产品的整套模型数据，因此在运维阶段运营商能通过模型进行运维管控，基于模型实时取得产品信息，能全面且便捷地进行产品后期的运维[9]。随着数字化发展，新疆油田面临着数据需求数量大，管理点分布散，运营管控难度大等难题，王传平[10]等完成了油田的管理控制模型，实现了数字化的管控和移交。扶靓虔[11]等通过 MBSE 对关键设备维护工作进行了多级细化分析，给出了设计样例，实现了维护工作全面且合理的安排。

当前 MBSE 的思想与方法在各行业都应用广泛，并提出了相应的理论方法，但实际应用大多数仅仅局限于需求、设计部分，在生产制造和运营维护中的应用较少。本文将在 MBSE 的思想基础上，进行产品全生命周期中智能生产与运营维护两个重要阶段的研究，旨在搭建生产与运营的 MBSE 框架，并阐明其中的关键技术环节，推动未来 MBSE 应用的发展完善。

2 基于 MBSE 的智能生产与运营框架

MBSE 以系统工程的思想覆盖产品全生命周期的所有阶段过程，本文主要针对产品制造和运营环节进行研究，提出框架如图 1 所示。

1）总体设计阶段承接顶层需求，结合设计工艺阶段输入的产品数据信息，开展子系统生产交付运维供应链和产品数据管理的顶层设计。

2）生产制造阶段承接设计和工艺数据，开展 MBOM 顶层设计，并开展对生产计划排程、工单执行、进度监控和物料追溯等分布设计，完成产品生产制造阶段的分系统规划设计。

3）质量检验阶段数据来源于设计工艺和制造阶段，承接上游分系统数据创建质量检验数字模型，开展检验规程制定、检验计划、检验记录、质量问题处理和质量追溯等分步设计。

4）根据交付运维的总体设计要求，开展产品数字化交付、远程使用监控、数字化运维和远程调试维修等分步设计，完成交付运维阶段分系统规划。对于交付和运维阶段不合理的地方及时优化、及时纠正并形成闭环反馈机制。

5）产品数据管理转变为基于模型的数据管理方式。制定产品元数据规范，对数字模型进行规范化管理，提取数字模型特征，将数字模型特征与结构化数据关联，数字化模型之间通过数据管理实现数据共享。

6）通过 V 模型右侧分系统的分步实施，进一步验证各分系统参数设计的准确性和完整性，最终确定产品交付运维供应链及数据管理模型的合理性。

3 智能生产模式与运营管控

3.1 基于 MBSE 的智能化生产模式

目前大部分工业企业未构建起生产现场状况与企业计划管理层面的贯通和闭环反馈。企业管理层不能及时掌握车间现场的生产运行状态，决策缺乏全面、准确、及时的数据支撑。基于 MBSE 的智能生产模式创建车间生产现场的孪生模型，通过物联网实时采集现场数据反馈给虚拟模型，达到虚实共生、数据透明的目的。本文设计了基于 MBSE 的智能生产系统框架，如图 2 所示。

基于 MBSE 的智能生产系统框架从系统工程的角度完整仿真和管理生产过程，达到实时采集数据 - 智能分析问题 - 精准决策分析的效果。智能生产模型的效果如图 3 所示，物理模型通过物联网技术实时采集数据并上传给数字孪生模型，数字孪生模型通过智能仿真、AI 推测、大数据处理等手段及时发现问题，并将问题通过可视化的手段发给决策层，从而精准做出生产过程的优化决策。

（1）系统化生产　传统的制造过程都是在产品设计和工艺设计之后串行开展的，制造信息严重滞后于设计工艺数据，设计工艺问题到制造阶段才能发现，滞后性强，造成产品迭代周期长、生产成本高。MBES 概念的提出，将产品制造属性定义到三维数字模型里，MBD（Model Based Definition，基于模型的定义）产品数据集不仅包含实体几何和非几何信息，还包含产品的结构、工程注释及生产制造信息，如图 4 所示。

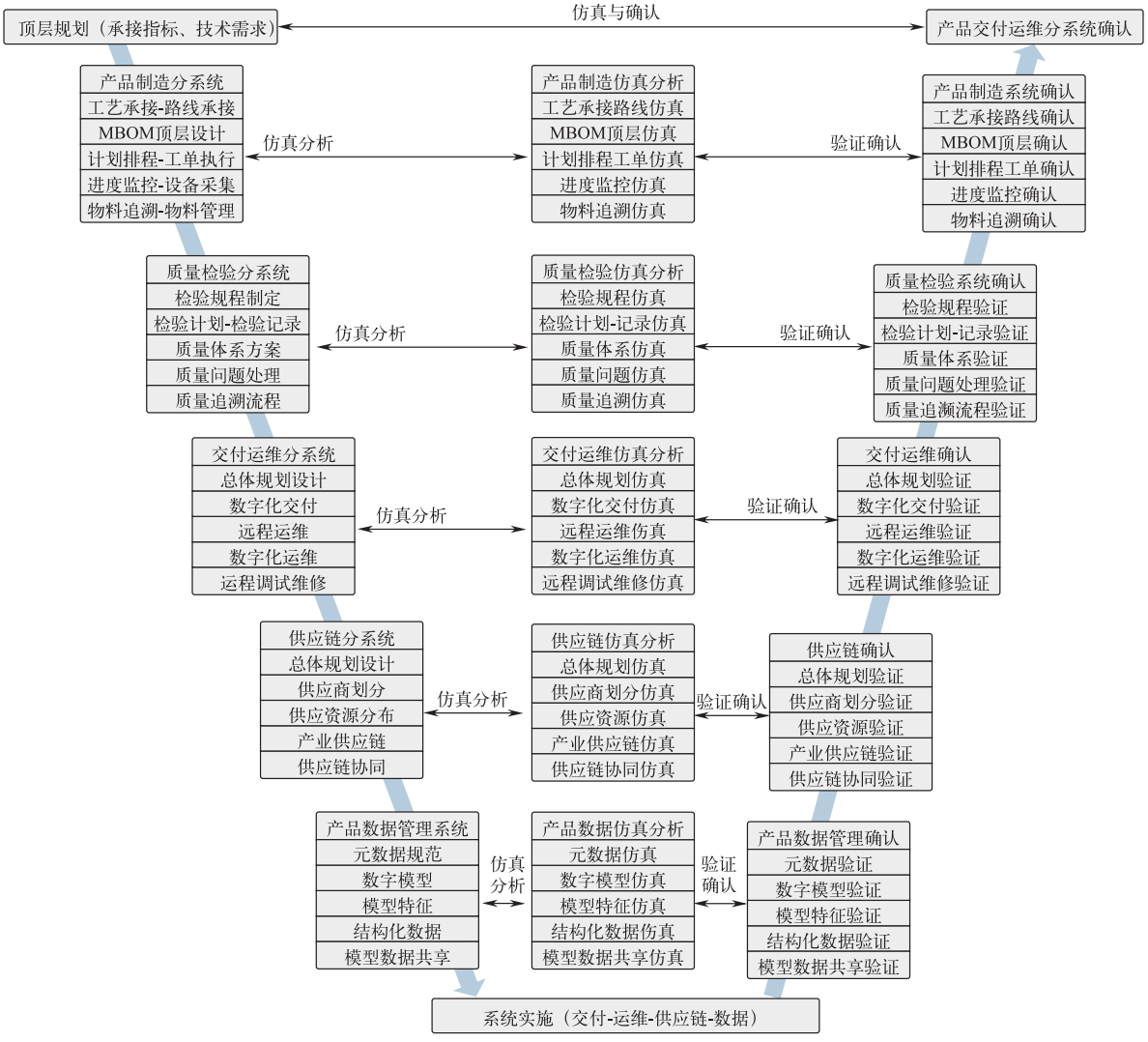

图 1　基于 MBSE 的交付运维及数据管理框架

图 2　基于 MBSE 的智能生产系统框架

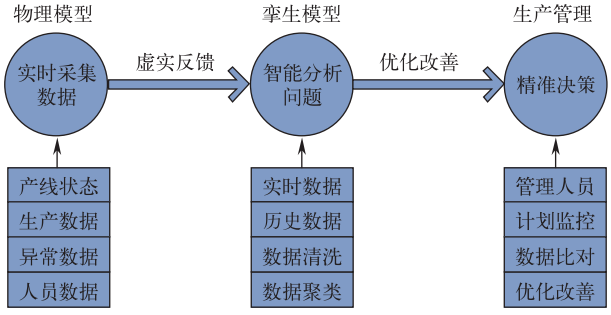

图 3　智能生产模型理念

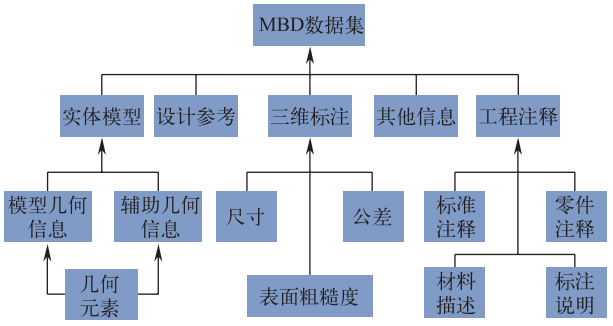

图 4　MBD 数据集定义

完整的 MBD 数据集的定义包含设计工艺和制造信息，从而将以模型为基础贯通产品设计工艺和制造数据成为可能。基于 MBSE 思想的系统化制造就是以 MBD 三维数字模型为基础，将产品的全周期数据都体现在数字模型上，从而统一产品从设计到工艺制造阶段所传递的数据标准，同时每个阶段模型验收的标准也在模型上进行体现，解决了不同阶段对产品数据定义和理解的不一致性。基于 MBD 的产品设计工艺制造流程如图 5 所示。

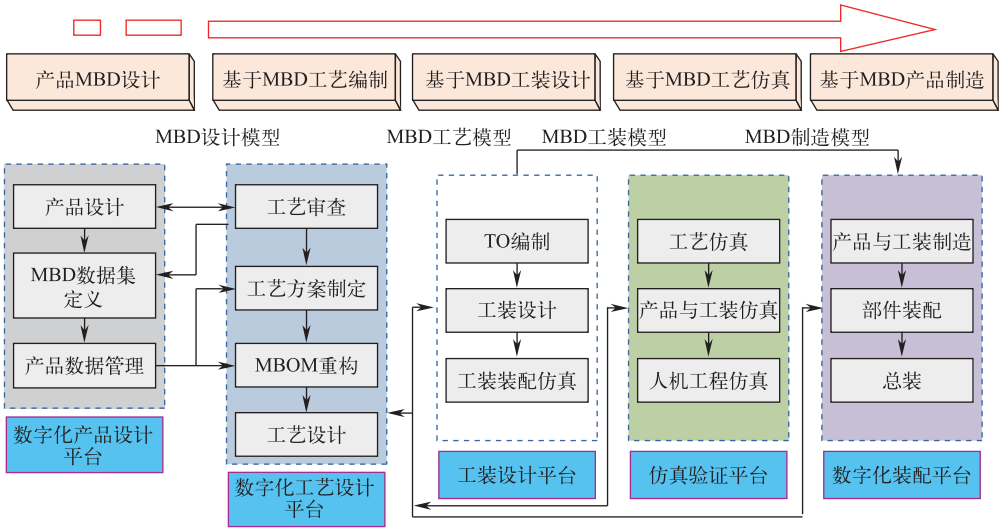

图 5　基于 MBD 的产品设计工艺制造过程

（2）系统化检验　传统的产品检验过程是从工艺阶段承接产品检测标准，质量部门制定检测计划，然后跟随零部件生产过程中进行测量检测，当发现有不良品或报废品时对检测数据进行记录，同时对不良品进行处理，并通过增加生产计划的方式进行补充计划数量的投产。这种检验方法和过程滞后于产品设计和工艺过程，设计工艺设计过程中的问题，需要等到零部件实际生产过程中才能进行测量验证。基于 MBSE 思想的系统化检验模型引入三维数字模型，数字模型承载零部件检验标准和验证指标，在产品设计工艺阶段也可通过三维数字模型的仿真手段进行测量标准的验证。

基于 MBSE 的系统化检验流程如图 6 所示，首先需建立 MBSE 检验数据集，该数据集是贯穿产品设计、工艺到制造环节的检验数据总的集合，产品设计、工艺和制造阶段的测量要求和标准都需提取并增加到该 MBSE 检验数据集合中。同时建立产品的三维检验数字模型，用于对产品生命周期不同阶段检验数据的仿真验证，检验数据集是三维数字检验模型仿真的数据基础，数据集用于指导数字模型仿真的规格参数及检验验证标准。

3.2　系统化运营管控

基于 MBSE 的思想将产品的交付运维阶段统一到系统工程的全局维度来考虑，提出产品的完整数字化交付、产品闭环数字化运营、远程数字化维修等新的系统化交付运维策略。

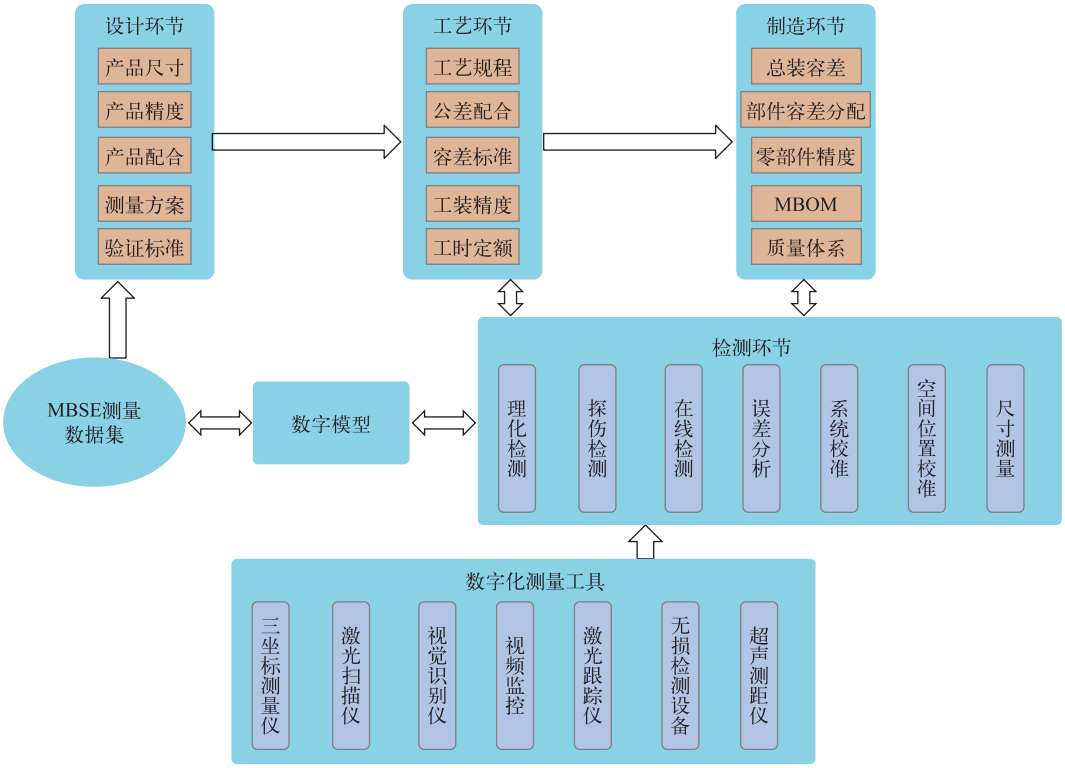

图 6　系统化检验流程

（1）数字化交付　工业复杂产品往往由众多零部件组装而成，零部件的生产检验和物流由不同的制造商和供应商完成，导致了不同零部件最终交付的数字模型和数据格式不统一，给后期全生命周期的运维带来很大障碍。为了统一产品最终交付用户的数字模型和技术资料的格式，必须解决异构数字模型的通用转换和技术数据的格式转换问题。

首先需制定产品通用的模型和数据描述标准，包括三维模型、工程属性、拓扑关系、尺寸信息、位置信息和供应商信息等，这是模型和数据通用的基础，不同制造商和供应商必须在通用的模型和数据标准上建立自己所负责产品的数字模型和技术数据描述。其次主制造商需建立支持多源模型导入和数据转换的集成平台，集成平台需实现对目前主流三维设计工具和产品数据管理软件的数据格式转换。针对分制造商和供应商提供的零部件交付模型和技术数据，通过集成平台将产品三维数字模型、位置尺寸、拓扑关系、检验信息、制造数据和物流信息等转换成统一的格式文件，再将这些文件导入生成产品的总装数字模型和总装结构数据。最后将这些统一格式的数字模型和结构数据完整无损地交付给用户。

（2）数字化运营　产品经过数字化交付后到达消费者手中，进入产品使用运营阶段。传统的产品运营阶段，消费者使用和产品运行数据往往是与制造商分离的，制造商只能通过产品的定期维护维修或消费者的质量问题申诉获得产品的使用信息，这种方式不能及时发现产品运营过程中的问题，对产品的迭代设计优化也帮助不大。基于 MBSE 思想的产品运营提出打通产品使用阶段和制造商之间的信息壁垒，基于数字模型，通过对运营产品状态的实时采集获取产品运行数据驱动数字模型的仿真和验证，及时发现运营问题进行预警和改善。

随着 5G、物联网、CPS 和智能传感器等技术的发展，实现产品在运营使用阶段的实时数据采集成为了可能。以 MBSE 的思想，在产品数字化交付阶段就安装运营阶段产品关键状态数据的智能传感器，通过智能传感器和 CPS 网络实时将产品的运营数据传递给制造商。同时数字化交付阶段构建基于产品运营的数字模型和数据主线，通过 CPS 采集的产品运营数据可驱动数字模型进行产品仿真，及时发现产品运行中可能出现的问题，预测产品的使用寿命及获取用户的使用习惯，为产品的迭代优化和新产品研发提供数据支撑。实现打通产品运营状态采

集 - 实时监控 - 仿真分析 - 科学决策 - 精准执行的闭环管控链路，如图 7 所示，真正实现基于 MBSE 的产品从设计制造到交付运营的全闭环管理。

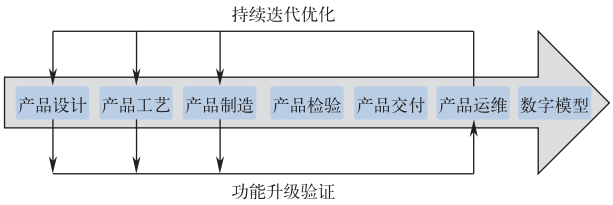

图 7　基于 MBSE 的系统化运维策略

（3）数字化维修　产品在交付给消费者后，运营过程中若出现质量问题需要主制造商或供应商进行维修处理。传统的产品维修一般是生产厂商上门或消费者将产品送到厂商的维修点进行维修，这种方式费时费力且维修成本高，有时维修过程需要迭代多次才能完成。基于 MBSE 的系统化运维的思想给产品维修提供了新的思路，基于数字化交付运维，我们能实时获取产品使用的状态参数，运营数字模型能实时模拟产品的运营状况，此时可以通过基于三维模型仿真的远程维修方法代替现场维修。

基于产品运营数字模型和运营过程采集的使用数据，产品维修人员可在三维模型上模拟用户的使用情况和产品质量问题，通过质量问题现象，分析产品软硬件参数之间逻辑关系，快速找到产品质量问题的原因。然后在数字模型里对多套质量问题解决方案进行仿真验证，确定最优的维修方案，然后通过数字模型、CPS 网络及现场的智能传感器修改产品的参数配置，从而远程完成产品质量问题的维修。

4　总结

本文基于 MBSE 的思想构建了产品交付运维供应链和数据管理子系统的框架，针对智能生产模式和运营管控策略进行了研究设计。

1）采用 MBSE 的 V 型系统工程思想。自顶层设计规划，依次完成交付运维分系统、供应链分系统、产品数据管理系统的设计与验证，最终合理完成顶层的设计规划需求。

2）设计了基于 MBSE 的智能生产系统框架。采用数字孪生技术实现生产现场的可视化管理，且基于模型的全生命周期保证设计、制造与验证系统化，加快产品研发速率。

3）提出了基于 MBSE 的系统化运营管控策略。保证数字化模型贯通运营与维修，实现全闭环管理。

本文完善了 MBSE 在生产阶段与运维阶段的研究，为推进实现 MBSE 的理想化应用提供了帮助。但本文尚未进行实际验证，只停留在理论阶段，希望未来能得以应用。

参考文献

[1] 国务院．国务院关于深化“互联网 + 先进制造业”发展工业互联网的指导意见 [EB/OL]．（2017-11-19）[2024-02-11]．https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5244870.htm．

[2] 周新杰，明新国，陈志华，等．基于模型、数据、知识的设计与制造协同框架 [J]．计算机集成制造系统，2019，25 (12)：3116-3126．

[3] 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．

[4] 梅芊，黄丹，卢艺．基于 MBSE 的民用飞机功能架构设计方法 [J]．北京航空航天大学学报，2019，45 (5)：1042-1051．

[5] 刘顺涛，邱世广．基于 MBSE 的飞机大部件智能装配能力建设方法 [J]．航空制造技术，2020，63 (Z1)：22-31．

[6] 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．

[7] 葛宇，周传君，丁勤，等．面向敏捷研制的小卫星全过程产品保证管理 [J]．航天器工程，2021，30 (6)：177-181．

[8] 蒋白桦，宋楠，索寒生．MBSE 驱动的石化资产全生命周期数字化系统研究与应用 [J]．人工智能，2021 (2)：68-76．

[9] 孙发亮．数字化交付在智能制造中的位置及发展趋势 [J]．中国仪器仪表，2019 (5)：32-36．

[10] 王传平，孟亮，冯学章，等．基于 MBSE 方法论在油气田数字化建设中的研究与实践 [C]// 中国石油学会天然气专业委员会．第 32 届全国天然气学术年会 (2020) 论文集，2020．

[11] 扶靓虔，苗壮．基于系统工程的研究堆启停与关键设计维护策略设计研究 [J]．核动力工程，2021，42 (S2)：159-164．

收稿日期：2024-03-21