

# MBSE技术在复杂系统测试数据采集中的应用前景展望

郑凯元\*, 姜志#, 陈爽爽

中国人民解放军63861部队, 吉林 白城

收稿日期: 2025年12月19日; 录用日期: 2026年1月29日; 发布日期: 2026年3月18日

## 摘要

基于模型的系统工程(MBSE)技术在复杂系统测试数据采集中展现出巨大潜力,但当前应用仍面临标准化程度不足、技术适配性差、流程管理复杂等挑战。本文通过深入分析MBSE技术在复杂系统测试数据采集中的应用现状与关键问题,结合国际先进实践与技术发展趋势,从标准化建模体系构建、技术适配性强化、全流程优化与迭代机制、跨领域协同生态建设四个核心维度,提出了系统性的提升策略。研究表明,通过建立统一的MBSE建模规范、优化工具与硬件兼容性、构建闭环管理流程,可显著提升MBSE在复杂系统测试数据采集中的应用效果,为高端装备测试鉴定的数字化转型提供重要支撑。

## 关键词

MBSE, 复杂系统测试, 数据采集, 标准化, 协同生态

# Prospects for the Application of MBSE Technology in Test Data Acquisition for Complex Systems

Kaiyuan Zheng\*, Zhi Jiang#, Shuangshuang Chen

Unit 63861 of the Chinese PLA, Baicheng Jilin

Received: December 19, 2025; accepted: January 29, 2026; published: March 18, 2026

## Abstract

Model-Based Systems Engineering (MBSE) technology shows enormous potential in test data

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 郑凯元, 姜志, 陈爽爽. MBSE技术在复杂系统测试数据采集中的应用前景展望[J]. 仪器与设备, 2026, 14(1): 55-62. DOI: 10.12677/iae.2026.141008

acquisition for complex systems, yet its current application is confronted with challenges such as insufficient standardization, poor technical adaptability and complex process management. By thoroughly analyzing the application status and key issues of MBSE technology in test data acquisition for complex systems, and combining international advanced practices and technological development trends, this paper puts forward systematic improvement strategies from four core dimensions, namely the construction of a standardized modeling system, enhancement of technical adaptability, full-process optimization and iteration mechanism, and development of a cross-domain collaborative ecosystem. The research shows that establishing unified MBSE modeling specifications, optimizing tool-hardware compatibility, and building a closed-loop management process can significantly improve the application effectiveness of MBSE in test data acquisition for complex systems, providing crucial support for the digital transformation of testing and evaluation of high-end equipment.

## Keywords

MBSE, Complex System Test, Data Acquisition, Standardization, Collaborative Ecosystem

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着高端装备复杂性的不断提升和应用场景的日益多样化,复杂系统测试数据采集面临着前所未有的挑战。传统基于文档的系统工程方法在处理海量、异构、实时数据时暴露出诸多不足,难以满足现代复杂系统测试的需求。基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering,以下简称MBSE)作为一种以模型为核心的系统工程方法,通过统一的建模语言和可视化工具,为复杂系统测试数据采集提供了全新的解决方案。

自2015年提出“数字工程战略”以来,将MBSE列为推进高端制造采购与工程实践现代化的关键技术,推动了从传统文档中心向数字模型中心的重大转型[1]。在这一战略背景下,MBSE技术在F-35、PAC-3 MSE等重大高端装备项目中取得了显著成效,设计迭代次数减少60%,验证周期缩短40%[2]。然而,MBSE在复杂系统测试数据采集中的应用仍处于探索阶段,面临着标准化程度不足、工具兼容性差等关键问题。

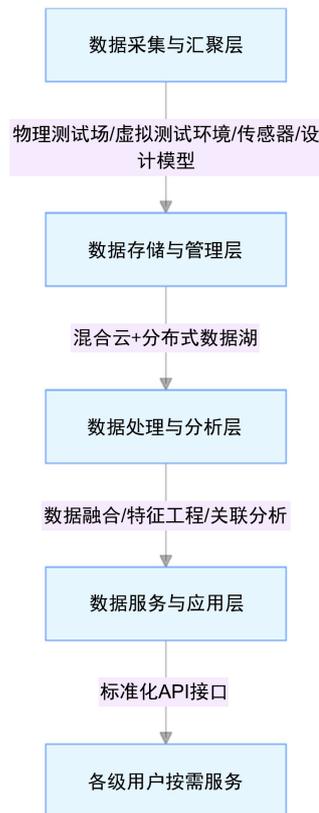
本文旨在深入分析MBSE技术在复杂系统测试数据采集中的应用现状,结合国际先进实践与技术发展趋势,提出系统性的应用效果提升策略,为推动高端装备测试鉴定的数字化转型提供理论指导和实践参考。

## 2. MBSE在复杂系统测试数据采集中的应用现状与挑战

### 2.1. 应用现状分析

当前,MBSE技术在复杂系统测试数据采集中的应用呈现出起步探索、成效初显、潜力巨大的特点。在技术应用层面,MBSE已在多个关键领域展现出独特优势。洛克希德·马丁公司在PAC-3 MSE精密制导系统中,通过MBSE模型实现了与新型雷达监测系统(LTAMDS)的集成,验证了跨平台数据实时融合的可行性,实现了360°全向状态感知与动态调控[3]。在数据采集标准化方面,高端装备测试已构建了“全域感知-精准采集-实时标注”的数据采集体系,确保每一组数据都能直接映射实际应用场景,标注准确率达到98%以上。

从技术架构角度看,现代复杂系统测试数据采集已形成了四层技术架构,结构如图1所示。



**Figure 1.** Architecture diagram of MBSE-driven test data acquisition technology  
**图 1.** MBSE 驱动测试数据采集技术架构图

在应用模式方面，MBSE 正推动复杂系统测试从传统的“记录”向“洞察”转变。面对多源异构、严苛环境与海量数据等挑战，边缘计算与人工智能技术成为关键支撑，使数据能够实时展示，驱动数字孪生技术发展，已成为提升装备研发效率与核心竞争力的新引擎。美国海军在数字化测试与评估转型中，提出了包含制定数字 T&E 战略、生成数字工程工件、数据收集、创建数字孪生、虚拟测试/仿真等十步流程的实施路线图。

## 2.2. 关键问题识别

尽管 MBSE 在复杂系统测试数据采集中展现出良好前景，但仍面临着五大关键挑战，严重制约了其应用效果的提升。

### 2.2.1. 标准化程度不足

不同机构和承包商使用不同的数据格式和遗留系统，这些系统无法与现代数字工程平台自然集成，数据互操作性成为关键障碍。在很多领域目前尚无基于标准的工具支持数字系统架构模型的跨行业交换，没有一个很好的渠道来实现向协作式基于模型的业务流程转型。同时，MBSE 的标准尚未完全统一，不同模型语言和工具之间的互操作性较差，各单位建模粒度不统一、模型管理不受控、模型协同难开展、模型成果难复用等问题突出。

### 2.2.2. 技术适配性差

MBSE 工具与现有工具链的集成存在严重问题，大多数组织使用多种工程工具，包括 CAD、仿真软件及项目管理平台，MBSE 工具集成不良导致数据孤岛，使协作困难，冗余流程减慢工作流程。从一个

工具向另一个工具导入数据经常导致错误、数据丢失或效率低下，这种碎片化严重影响了系统工程作为单一数据来源。

### 2.2.3. 模型复杂性管理困难

高端装备系统的复杂性导致 MBSE 模型的规模和复杂度急剧增加，如 F-35 全系统仿真需要 1.2 PB 存储，对计算资源和管理能力提出了极高要求。在设计模型与仿真模型之间的互操作性、统一描述与转换等功能上仍有不足，系统设计与虚拟验证之间尚未贯通，无法满足一体化设计与验证、全阶段模型一致性要求等。

### 2.2.4. 组织文化转型阻力大

最大的难点在于转变组织思维方式和文化，习惯于处理文档的团队需要学习新的工具和方法。不同的 MBSE 项目可能采用不同的数据交换格式，阻止了利益相关者之间的信息共享。从基于文档的文化过渡到植根于数字模型的文化需要范式转变，这增强了信息连续性和可追溯性，但也面临着巨大的变革阻力。

### 2.2.5. 数据安全与管理风险高

在数据存储环节，传统的集中式存储方式容易成为黑客攻击的目标，一旦存储服务器被攻破，大量的 MBSE 模型数据可能会被窃取或篡改。高端装备测试数据涉及大量敏感信息，对数据安全和隐私保护提出了更高要求。同时，数据管理和整合面临挑战，如何确保数据的质量、一致性和实时性是关键问题，缺乏有效的数据整合和管理机制会直接影响模型的准确性和可靠性。

## 2.3. 发展趋势分析

面向未来,MBSE 在复杂系统测试数据采集中呈现出四大发展趋势,各种趋势所面临的挑战如图 2 所示。

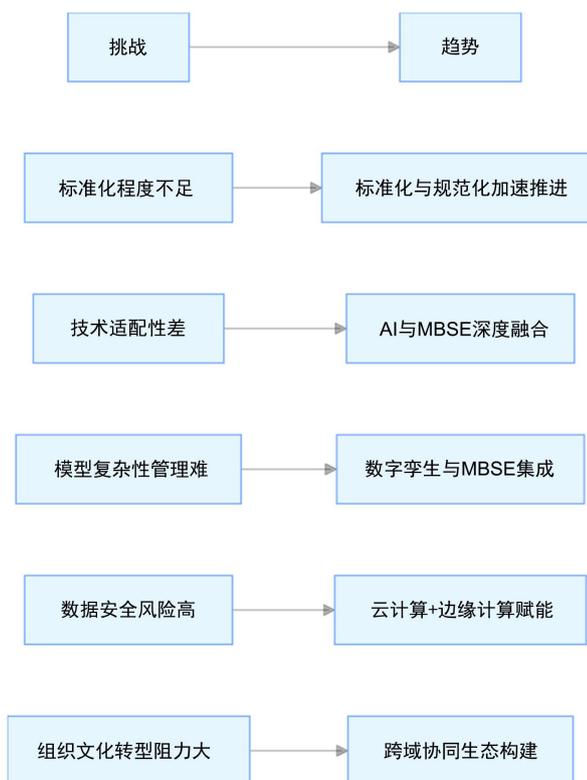


Figure 2. Corresponding diagram of key challenges and development trends in MBSE applications  
图 2. MBSE 应用的关键挑战与发展趋势对应图

### 2.3.1. AI 与 MBSE 的深度融合

洛克希德·马丁公司将 AI 深度嵌入 MBSE workflow, 例如在 OSIRIS-REx 样本返回任务中, 机器学习模型自动识别轨道偏差并生成最优修正方案, 使任务验证效率提升 7 倍[4]。生成式 AI 在 MBSE 中的应用包括主动需求捕获与初步构建, AI 能高效解析海量非结构化数据, 自动提取关键需求元素, 并生成初步的 SysML 需求图。在多系统互操作性开发中, 生成式人工智能加速代码生成, 同时嵌入多级安全控制, 确保跨系统数据交换的安全性。

### 2.3.2. 数字孪生与 MBSE 集成应用

F-35 的“生产系统”(FPS)通过数据驱动模式, 将数字孪生与 MBSE 结合, 实现了制造流程的动态优化, 虚拟验证平台通过 5 万次仿真优化燃料过滤系统设计, 使星舰试飞的隔热瓦脱落率下降 70% [5]。在精密制导领域, 基于 MBSE 的数字孪生建模方法实现了复杂应用场景精确构设, 建立了基于 LVC (Live-Virtual-Constructive)的虚实结合分布式仿真体系架构, 实现了虚实交互与高效协同。

### 2.3.3. 云计算与边缘计算赋能

美国太空探索技术公司正在开发名为“Swarm”的新型基于云的数字测试环境, 这是一个多分类数字环境, 各单位人员可以聚集在一起开展模拟测试。在高端装备应用中, 边缘计算能够显著减少数据传输延迟, 提高响应速度, 5G 技术和边缘计算的结合为装备数据传输带来了协同效应, 5G 提供高速传输通道, 边缘计算确保数据处理的即时性和高效性。

### 2.3.4. 标准化与规范化加速推进

2024 年, 澳大利亚引入了受美国倡议影响和基准的自己的数字工程标准。中国也发布了首个自主原创的统一架构建模语言规范国家标准, 以多架构建模语言 KARMA 为基础, 制定了面向复杂系统统一架构建模的语义规范, 支持 MBSE 与数字工程等系统数字化研发新范式[6]。在数据标准方面, 《国家数据标准体系建设指南》已经出台, 为高端装备数据标准体系建设提供了重要遵循[7]。

## 3. 提升 MBSE 在复杂系统测试数据采集中应用效果的策略体系

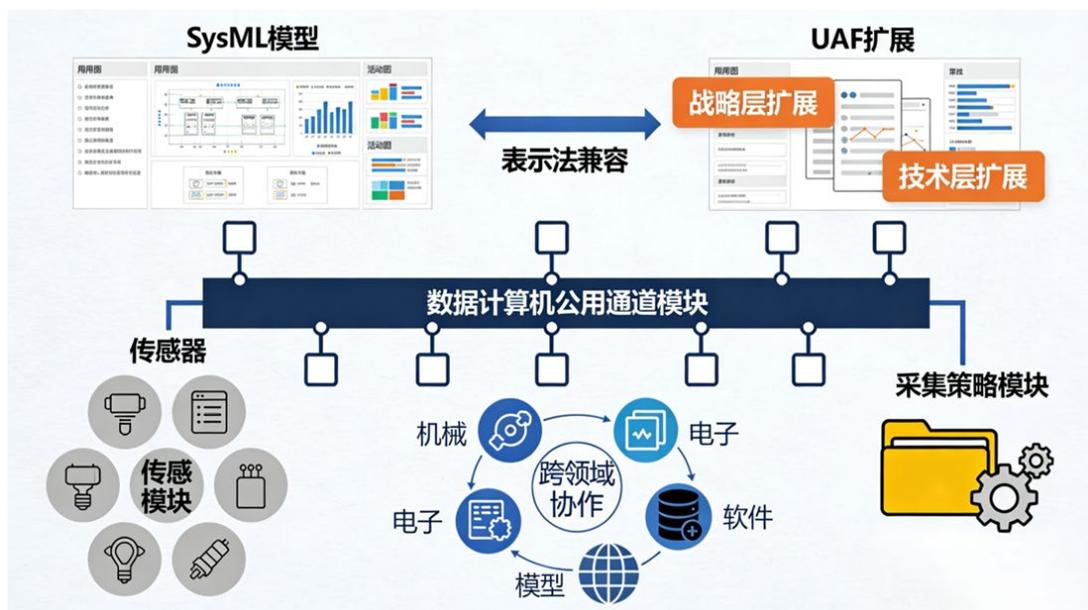


Figure 3. Collaboration diagram of SysML and UAF integrated application  
图 3. SysML 与 UAF 融合应用协作图

复杂系统测试数据采集的核心要素包括传感器、数据总线、采集策略三大模块，SysML 与 UAF 的融合应用为其提供了标准化建模方案[7]。UAF 作为统一架构框架，通过 UAF 配置文件(UAFP)扩展 SysML 的立体图、标签值等元素，实现从战略到技术层面的全维度建模，且与 SysML 表示法完全兼容，支持跨领域协作，协作机制如图 3 所示。

基于对应用现状与挑战的深入分析，结合国际先进实践与技术发展趋势，应建立“标准化建模、技术适配、流程优化”三大提升策略体系，形成系统性的应用效果提升方案。

### 3.1. 推进建模标准化与规范化

#### 3.1.1. 制定适配复杂系统测试场景的 MBSE 建模规范

建立覆盖装备设计研发、生产制造、测试、交付、保障、管理等全生命周期活动的数字化研发标准建设体系。具体包括：数字化顶层通用技术标准，用于规范工作目标、工作项目和工作要求；数字化设计标准，指导需求模型构建、数字化协同设计等活动；数字化测试标准，指导数字化测试设计分析、流程管理等活动；数字化管理标准，指导全生命周期数据与模型技术状态管理活动。在顶层规范中，应明确基于模型的系统工程相关术语定义、岗位要求，面向装备设计、工艺、生产等阶段，明确系统、分系统、单机等多级模型的设计要求、实施步骤、工作方法、交付物。

#### 3.1.2. 统一数据元标准体系

将复杂系统测试中的总线数据、定位数据、运行状态参数、音视频数据、通信参数等各类数据的格式、编码、采集精度等纳入统一的模型规范。需要制定《XX 数字化大纲》《XXMBSE 总要求》等顶层文件，在装备顶层通用技术标准中提出基于模型的系统工程相关要求。

#### 3.1.3. 建立标准化建模模板库

针对不同复杂系统测试科目(如车辆性能测试、通信系统测试、精密仪器测试等)提供标准化建模模板，减少重复工作。模板应涵盖需求模型、功能模型、结构模型、行为模型等各类模型的标准框架，并提供详细的建模指南和最佳实践。通过模板化设计，可以确保不同项目、不同团队的建模工作遵循统一的规范，提高模型的一致性和可复用性。

### 3.2. 强化 MBSE 与复杂系统测试技术的适配性

通过优化 MBSE 工具与数据采集硬件的兼容性，使传感器、数据采集终端等设备的接口模型化定义，实现即插即用。在实际工作中，建模工具需与仿真环境(如 VBS、STK)、版本控制系统(如 Git)和需求管理工具(如 DOORS)集成，形成“建模 - 仿真 - 验证”闭环。MBSE 平台提供强大的信息或模型交换、访问控制功能以及数据标记和分类机制，在不影响知识产权的情况下更轻松地进行协作。

开发复杂系统测试专用的 MBSE 仿真模块，模拟复杂测试环境(如电磁干扰、极端气候、通信中断等)下的数据采集过程，提升方案鲁棒性。在数字测试实施中，通过数字孪生实现测试计划和执行的自动化，使用下一代测试点数据库工具，将手动测试规范转换为可复制各个测试点性能的数字孪生，这些数字孪生可以模拟复杂的操作场景，并允许使用虚拟模型进行测试前演练，从而在实际测试开始前发现潜在问题。

融入人工智能技术实现智能化采集，通过 MBSE 模型联动数据分析算法，实现采集数据的实时预处理与异常识别。在实际应用中，AI 与 MBSE 的融合已经展现出巨大潜力，如在多场景模拟平台中，支持多域应用(MDO)和联合全域应用(JADO)模拟，可生成 100 多种报告分析应用效能评估、运维保障等场景，在模拟极端环境应用时，通过数据驱动优化设备部署，使补给路线效率提升 40%。

### 3.3. 优化全流程落地与迭代机制

构建“需求-模型-采集-验证”闭环流程，如图4所示。基于MBSE模型跟踪数据采集全过程，确保采集行为与测试目标一致。在测试鉴定数字线程构建中，将需求从静态文档转换为链接测试计划、执行和分析的动态数字表示，数字线程集成了实时、虚拟和构造(LVC)测试环境，通过提供实时模型验证和无缝数据传播，支持运营准备和风险评估。在具体实施中，建立从需求分析、模型设计、数据采集、实时监控到结果验证的完整闭环，确保每个环节都能及时反馈和调整。

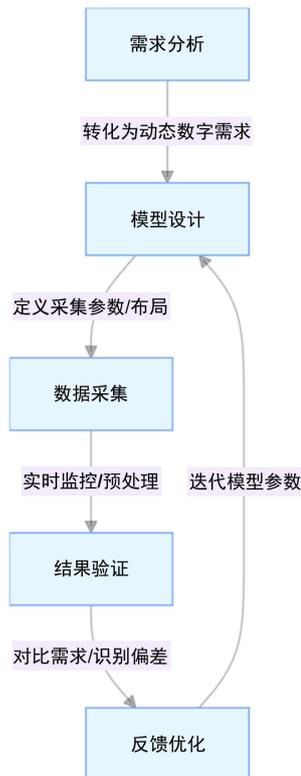


Figure 4. “Requirements-Model-Data Acquisition-Verification” closed-loop process diagram  
图4. “需求-模型-采集-验证”闭环流程图

建立模型迭代更新机制，根据每次复杂系统测试的实际数据反馈，优化模型中的采集点布局、采样频率等参数。以MBSE为框架，通过用全面的数字模型取代传统的以文档为中心的方法，用于集成测试计划、执行和分析反馈，并在整个开发过程中不断更新。

## 4. 结论

MBSE技术通过统一建模、跨域协同、闭环验证等核心优势，有效解决了复杂系统测试数据采集的多源异构、信息不一致、协作低效等痛点。本文提出的四维策略框架，明确了SysML/UAF的建模方法、四级技术架构、协同生态建设路径与闭环验证体系，通过实际案例验证了其可行性与有效性。未来，随着标准化进程的加快与技术融合的深化，MBSE将在复杂系统测试数据采集集中发挥更大价值，推动测试领域向标准化、智能化、高效化方向发展。

本文通过构建提升MBSE应用效果的系统性策略框架，以分阶段实施、风险防控、保障机制建设等措施，加快推进MBSE技术在复杂系统测试领域的全面应用，为推动高端装备测试鉴定的数字化转型提

供了理论指导和实践参考，为高端装备产业的高质量发展提供了强有力的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 中国电子技术标准化研究院. 基于模型的系统与软件工程方法和工具标准发展报告[R]. 2025.
- [2] 曹裕华, 王元钦, 罗小明, 等. 装备测试理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 44-45.
- [3] Anyanhun, A.I. and Edmonson, W.W. (2017). Inter-Satellite Communication MBSE Design Framework for Small Satellites. *2017 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Montreal, 24-27 April 2017, 1-7. <https://doi.org/10.1109/syscon.2017.7934707>
- [4] Wang, W.Y., Hou, J.J., Mao, Y.X., *et al.* (2021) Application and Development of MBSE in Aerospace. *The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Nanjing, 29-31 December 2021, 1-6.
- [5] Kaslow, D., Soremekun, G., Kim, H. and Spangelo, S. (2014) Integrated Model-Based Systems Engineering (MBSE) Applied to the Simulation of a CubeSat Mission. *2014 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, 1-8 March 2014, 1-14. <https://doi.org/10.1109/aero.2014.6836317>
- [6] 吴滨, 穆歌, 李大勇, 等. 高端装备测试设计原理[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(1): 24-27.
- [7] Zhu, S., Tang, J., Gauthier, J. and Faudou, R. (2019) A Formal Approach Using SysML for Capturing Functional Requirements in Avionics Domain. *Chinese Journal of Aeronautics*, **32**, 2717-2726. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.03.037>