第 40 卷 第 1 期 实 验 流 体 力 学 Vol. 40, No. 1
2026 年 2 月 Journal of Experiments in Fluid Mechanics Feb., 2026

文章编号: 1672-9897(2026)01-0099-08 doi: 10.11729/syltlx20230094

基于 MBSE 的风洞数字化研制模式构建及实现

闫喜强, 李宁波*, 符澄, 盖文, 汪询

中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 绵阳, 621000

摘要: 现代数字化技术正在引发航空航天领域发展模式的巨大变革。风洞作为飞行器的摇篮, 其研制人员必须深刻把握数字化发展新趋势, 积极主动适应基于模型的系统工程(MBSE)这一数字化研制模式, 大力推进风洞设计、建设及运维的数字化转型。本文首先介绍了国内外相关行业基于 MBSE 的研制情况及应用效果, 对当前风洞的数字化研制现状进行了对比分析, 指出了现有研制模式的不足; 然后在此基础上构建了基于 MBSE 的风洞数字化研制模式, 并详细介绍了该模式下的设计、建设、运维流程及其在某大型风洞研制上的应用探索; 最后, 为满足基于模型的风洞数字化研制需求, 构建了协同设计与仿真平台, 为进一步提升风洞数字化研制水平提供了有效支撑。

关键词: 数字化; 风洞; MBSE; 研制模式

中图分类号: V1 **文献标识码:** A

Construction and implementation of digital wind tunnel developing mode based on MBSE

YAN Xiqiang, LI Ningbo*, FU Cheng, GAI Wen, WANG Xun

Facility Design and Instrumentation Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, 621000, China

Abstract: A huge change in the development mode of the aerospace field is taking place due to modern digital technology. As the cradle of aircraft, the development of wind tunnel must deeply grasp the new trend of digital development, actively adapt to the digital development mode of Model-Based System Engineering (MBSE), and strive to promote the digital transformation of wind tunnel design, construction and operation. This paper introduces the development and application results based on MBSE in relevant industries at home and abroad, compares and analyzes the current situation of digital development of wind tunnels, points out the shortcomings of the existing development mode, and constructs a digital development mode based on MBSE. The design, construction, operation, and maintenance process of this model and its application in the development of a large wind tunnel are introduced in detail. Finally, in order to meet the requirements of model-based digital development of wind tunnels, a collaborative design and simulation platform is constructed, which provides effective support for further improving the level of digital development of wind tunnels.

Keywords: digitization; wind tunnel; MBSE; developing mode

0 引 言

系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法[1]。其研究起步于 20 世纪 40 年代, 此后随着航空航天科技的发展, 逐步获得完善与广泛应用[2-7]。针对目前大型装备系统复杂度不断增加的特点, 传统以静态文档为载体, 缺乏结构、电子、电气、液压、软件等多学科有效协同

收稿日期: 2023-07-24 ; **修回日期:** 2024-03-07 ; **录用日期:** 2024-03-14

基金项目: 空气动力学国家重点实验室创新基金项目(JBKYC190101); 实验技术研究项目(2022G02000220007)

* 通信作者 E-mail: nli_cn@163.com

引用格式: 闫喜强, 李宁波, 符澄, 等. 基于 MBSE 的风洞数字化研制模式构建及实现 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(1): 99-106.

YAN X Q, LI N B, FU C, et al. Construction and implementation of digital wind tunnel developing mode based on MBSE[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(1): 99-106.

的系统工程方法已难以适应当前研制任务需要。为了应对此问题，INCOSE 基于流程–结构化的过程知识和模型–结构化的元素关系创建了基于模型的系统工程（Model-Based System Engineering, MBSE）方法[8]。此后，美国和一些欧洲工业强国基于此方法对复杂装备研制进行了广泛的实践探索与理论创新[4, 9]。

大型风洞、高超声速飞行器等装备具有系统复杂、技术难度大、集成度高、产品研制必须一次成功等特点[10-14]。当前我国空气动力装备、空天装备进入并跑领跑新阶段，面临用户要求高、技术难度大、研制周期紧、任务交叉重等现实挑战[15]。因此迫切需要建立需求驱动、模型驱动、数据驱动的正向研发模式，创新工具手段和方式方法，以数字化、网络化、智能化等新技术促进研制模式转型升级，以模型为中心，通过流程–结构化的过程知识降低复杂空气动力与空天装备系统的结果不确定性，采用模型–结构化的单元关系推动风洞和飞行器全生命周期的协同研制演进。

本文基于在大型复杂装备数字化建设中广泛应用的 MBSE 方法，构建风洞的数字化研制模式，探讨其在某大型风洞研制中的应用。同时，为有效支撑研制模式升级，构建了协同设计与仿真平台，为进一步提升风洞的研制水平进行了有益探索。

1 国内外数字化技术现状

当前，数字孪生、MBSE 等数字化技术被广泛应用于国内外航空航天领域复杂装备研制模式的数字化转型升级中。数字孪生是复杂装备的数字映射系统，强调采用数字模型、历史数据和实时状态，通过多维度仿真技术手段构建虚拟空间的数字装备。MBSE 是一种方法论，强调采用模型化的手段实现复杂装备研制组织和管理。MBSE 技术是实现数字孪生的一种有效手段，各国都进行了广泛的探索。

在战略层面，2018 美国国防部发布了“国防数字工程战略”[16]，其核心是将国防工业体系从以文档为中心的线性采办向以数字模型为中心的数字工程转变。主要从过程数字化与产品数字化两方面入手，构建数字工程贯穿系统全寿命周期的研制模式，实现同时向需求方交付实体和数字化装备。欧盟在其战略性科研与技术开发计划（“地平线 2020”）[17] 的指引下，进行了航空航天领域的数字化转型。其中，虚拟化航空协同企业项目 VIVACE 重点开发了虚拟的并行工程设计环境，通过建模与仿真来优化整个设计过程。在 VIVACE 的基础上，欧盟进一步开展了协同优化与鲁棒性工程 CRESCENDO，提出了数字飞机的概念，创建了全产品生命周期所需的所有功能架构和数字组件。我国围绕建设航空航天强国的目标，积极实施航空航天数字化战略转型，提出了构建模型和数据驱动的科研生产数字化体系。在设计与生产层面，采用 MBSE 方法，完善各种型号产品的数字化协同研制环境，强化虚拟设计与仿真验证应用，同时构建柔性化、智能化的制造体系，提高设计与生产效率；在运维层面，构建复杂装备的敏捷服务和精准保障体系，实现基于数字孪生技术的装备综合保障，提升运营管理效益。

具体到装备层面，针对飞机的数字化设计，美国、欧洲、俄罗斯、日本等的航空企业高度重视数字化技术及其工程应用，以波音、洛克希德·马丁和空客为代表的一批航空巨头全面采用数字化研制模式，具备了全生命周期产品数据管理和数字化协同研制能力，取得了巨大的竞争优势和经济收益。中国商飞公司也进行了 MBSE 的数字化实践，形成了支撑全生命周期数字化研发的体系，提升了产品研制质效。

在大型运载火箭的数字工程方面，Space X 在设计和开发火箭和宇宙飞船等航天器时，采用了 MBSE 方法来支持系统的设计、分析和验证，大幅提高了效率、降低了成本。我国新一代大型运载火箭长征五号于 2016 年启动数字样机工程[18]，突破了多项关键工程难题，形成了面向大型运载火箭的数字化设计流程及支撑数字化研制模式的标准规范体系，取得了显著成效。

在航天器数字化建设方面，中国空间技术研究院以建设“数字空间站”为目标，基于 MBSE 方法与数字样机技术，初步构建了“数字–天–地”孪生系统[19]。在此基础上，开展任务前地面仿真模拟、在轨实时全面监测和运行状态快速预示，为空间站在轨运营提供长期、持续的数字化支撑。

2 基于模型的数字化研制模式

2.1 当前研制模式与不足

当前我国风洞研制模式的流程为：首先由用户单位提出需求，设计建设单位基于国内外现有的风洞情况及以往经验开展方案设计，确定总体布局；然后，根据总体布局构建功能原理方案，明确各子系统的功能划分与性能要求，进行技术与施工设计；最

后，根据设计方案进行施工建造并进行集成装配与测试，实现最终的装备交付与运行。整个流程基于系统工程思想，采用运筹学的理论和方法以及计算机技术，对风洞各子系统进行综合设计以达到最优效果。当前研制模式为我国风洞事业跻身世界一流做出了巨大贡献。

随着数字化技术的不断发展，MBSE 理论被提出并在一些领域开始有了初步的探索。以 MBSE 最新理论为参照，当前研制模式的不足逐渐体现出来。当前模式针对使用需求进行总体设计，但对需求在全流程中的分析与管理不充分，各子系统设计的协同优化考虑不足，迭代闭环的验证少；以静态文档的方式进行数据的传输，既难以对数据进行有效管理，造成数据源与版次的确认问题，也无法实现需求的全周期追溯与确认。结合具体分析，当前研制模式在数字化方面的不足可以总结为以下 4 点：

1）正向研制能力亟需提升。需求驱动与管理未充分利用数字化领域的最新研究进展，需求来源于试验单位任务牵引，向作战需求延伸不充分，无法实现需求在产品研制全生命周期的追溯；概念设计、正向设计支持工具不足，MBSE 中的设计空间探索、多方案生成与优化、系统各个环节闭环验证等创新理念有待加强。

2）系统最优能力亟需提升。设计组织模式以“气动引领结构和测控”为主，多专业间并行协同不充分。数字化理论与工具应用不足，未能充分协调各专业子系统在技术指标分配、研制周期方面的冗余能力，导致局部最优解并非系统最优解，需从系统层面开展全局寻优。

3）信息传递载体有待优化。多专业、多系统、多阶段、跨单位之间的信息传递主要以文档为载体，海量信息分散于各个文档，非结构化的文档表达难以保证一致性和完整性，易产生歧义；文档传递过程中，版本控制复杂，修改后溯源难度大，增加了技术状态同步的工作量。

4）产品性能验证方式有待优化。由于现有数字化方法与工具的限制，概念设计阶段未有效建立基于闭环物理过程的高精度系统级仿真，未能利用多种仿真手段开展技术方案的多环节验证与迭代优化，实物验证是最终性能指标最主要的验证方式，但周期长、问题暴露晚，增加了研制的技术风险。

2.2 数字化研制模式构建

针对当前风洞研制模式的不足，借鉴 MBSE 方法在大型复杂装备数字化建设领域研究成果，本文对原有研制模式进行了升级改造，构建了基于模型的风洞数字化研制模式，其整体流程如图 1 所示。该模式在业务流程上，可分为数字化设计、数字化建设和数字化运维，突出研制过程中的需求驱动、模型驱动与数据驱动。其通过以需求驱动为牵引提升正向研制能力；借助模型取代文档以实现信息在全流程、多系统间的传递与管理；结合 MBSE 可在全回路快速仿真迭代的特点，基于模型与数据，实现设计方案的优化与性能验证。

2.2.1 数字化业务流程

1）数字化设计流程

数字化设计流程为图 1 中 V 形图的左侧设计部分和中间各虚拟环节，涵盖顶层的系统方案设计，包括需求分析、功能构建、逻辑架构设计与总体方案设计。以总体方案架构为基础，进一步开展各分系统的架构设计和详细方案设计，最终形成基于模型的施工图。在各层次、各专业模型的基础上，进行虚拟制造、装配、调试与运行，形成风洞数字装备。此外，在各流程和环节都可进行闭环仿真分析，实现系统模型的集成、测试与迭代优化。

2）数字化建设流程

数字化建设流程包括图 1 中 V 形图的底部制造部分和右侧集成与调试部分，涵盖工艺设计、加工制造，以及各分系统和全系统的集成、调试、性能验证。在工艺与制造环节，可实现三维标注与制造仿真。由于基于统一的模型，工艺的更改可实现全流程传递。在实体系统的集成与调试环节，可以通过与 V 形图中各虚拟环节进行交互，提高建设效率，降低成本。

3）数字化运维流程

数字化运维流程主要通过数字孪生体的交互实现，该数字孪生体由数字化设计交付的风洞数字装备与数字化建设交付的实体风洞装备形成。数字化运维流程涉及多种技术能力，如数据采集、处理和集成技术，能够对模型数据、风洞运行历史数据、风洞实时状态数据进行统一管理，支持各类数据库的动态配置；又如实时监测和分析技术，能够利用大数据与人工智能算法对异常数据或状态进行识别；此外，可视化和交互技术还能够实现视景生成与可视化呈现。

风洞数字孪生体示意如图 2 所示。数字孪生体包括风洞数字装备、历史数据和实时状态信息。实

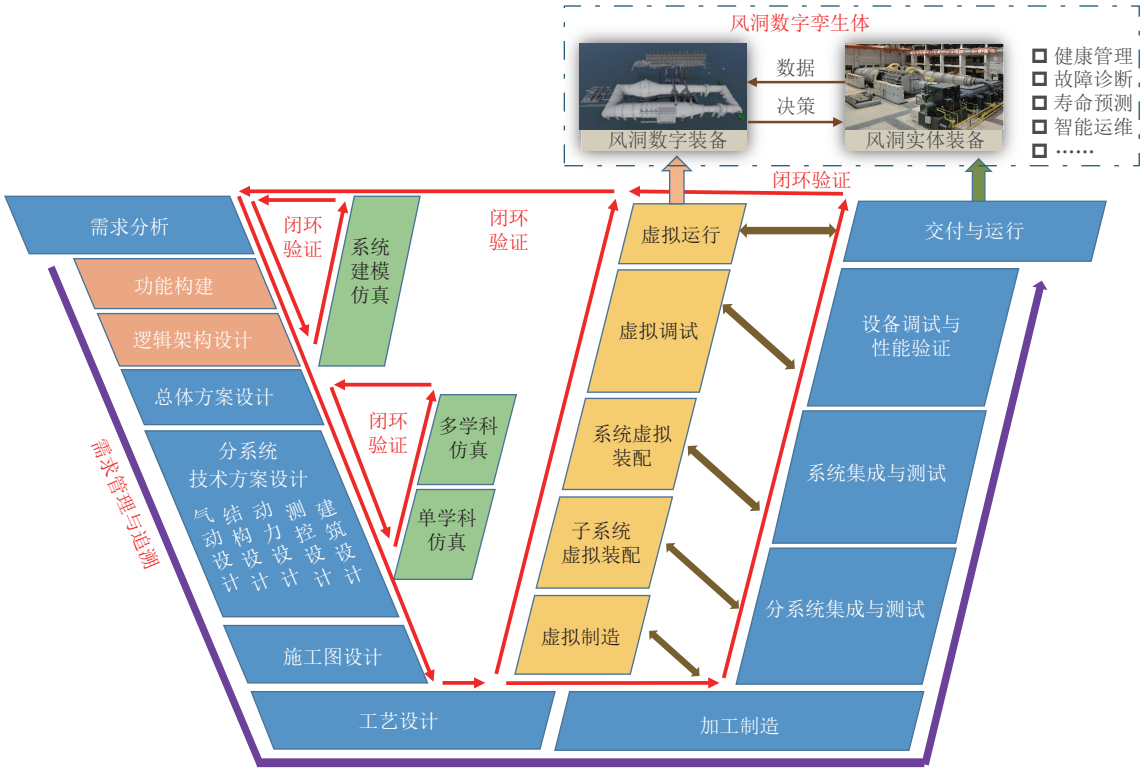


图 1 风洞数字化研制模式图

Fig. 1 Digital wind tunnel developing mode



图 2 风洞数字孪生体

Fig. 2 Digital twin of wind tunnel

体风洞通过状态监测与数据测量提供各设备部件的运行状态与性能参数并传输给数字风洞；数字风洞进行运行模拟，结合海量历史数据与实时信息进行分析，进而为实体风洞提供健康管理、故障诊断和寿命预测等决策支持。决策通过控制指令传输给实体风洞。

2.2.2　数字化研制内涵

1)需求驱动

传统的风洞研制模式在系统方案设计之初就将需求进行冻结，未能在设计过程中根据反馈信息对需求进行适应调整。本文提出的研制模式以需求驱动为牵引，在需求管理上涵盖需求的捕获、分析、权衡协调、验证与确证，在流程上将需求贯穿于研制的全周期。先通过对用户单位的业务需求进行分析，将其转化为可量化、可验证的风洞建设总体方案需求，开展系统的架构设计，包括功能架构与逻辑架构构建；再基于总体架构方案，把需求细化为各分系统的底层具体需求，在设计、制造、装配、集成与调试全流程对各层级需求进行迭代验证，直至确认装备满足用户单位需求。建立需求驱动流程可加深对风洞建设需求与复杂系统的理解，增进用户单位与建设方的交流，有效实现需求变更管理，提升风洞研制的效率与质量。

2)模型驱动

现有风洞研制模式的各流程间难以高效沟通的主要原因是采用文档静态信息传递模式，本文构建的研制模式基于模型实现需求、架构、功能及性能参数的动态传递，使整个系统各领域、各专业人员间能高校理解、沟通。针对风洞实际各研制环节，分别建立需求模型、功能架构模型、逻辑架构模型、物理架构模型和涵盖跨领域、多学科的子系统详细设计模型，通过各层级、各子系统模型的集成与闭环设计，最终实现风洞数字样机交付，为后续智能运维提供支撑。

3)数据驱动

数据驱动主要体现为数据跨专业、跨流程的实时共享与高效利用。本文构建的研制模式主要通过设计资源集成管理平台，利用数字线程技术，在纵向上实现全研制周期、跨全业务流程的数据传递与整合，在横向上实现多领域、多专业的数据传递与整合，形成复杂风洞系统的全局唯一真相源与完整的数据视图。此外，数据科学和人工智能近年来快速发展，合理利用这些技术能够大幅提升风洞运维效率。本文构建的研制模式通过数字样机与实体风洞构成数字孪生体，在此基础上，通过虚实交互实现智能运维。同时，基于数字风洞还可以进行海量、极限危险工况的运行模拟，节省风洞试验的成本。

3　某风洞数字化研制示例

基于第 2 节构建的数字化研制模式，本节以某大型风洞为例，具体探讨了基于模型的各项数字化业务场景，其示意如图 3 所示。

根据研制流程，本节将业务场景分为 5 个部分，即系统架构设计、各领域子系统设计、装配制造、调

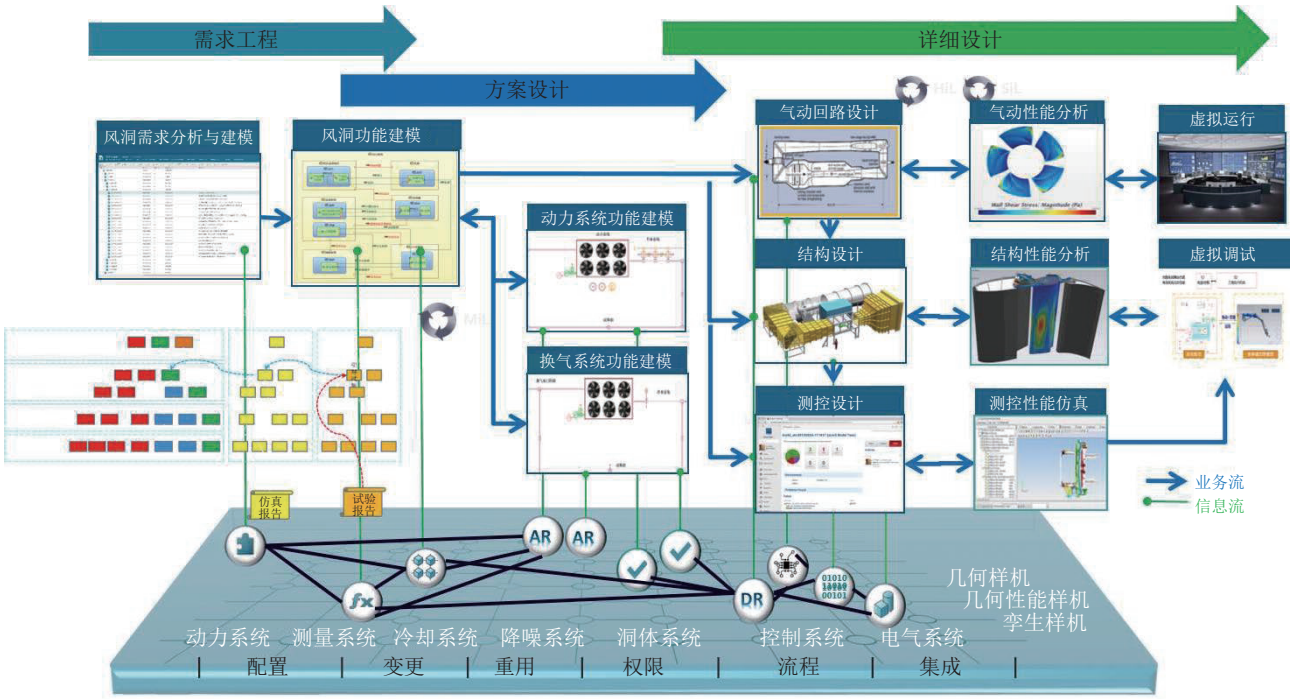


图 3　数字化业务场景

Fig. 3　Digital process scenarios

试和运维。该风洞已完成全部设计工作，并同步构建了相关数字样机模型，为正在开展的风洞建设调试和后续运行维护提供了数字化支撑。

1)系统架构设计

首先进行需求建模，采用条目化方法建立“用户需求–风洞需求–系统需求–部件需求”四级需求模型，开展基于模型的正向设计，解决风洞研制技术要求统一精细化管控和高效协同快速迭代的设计问题；其次基于需求模型，开展功能设计，构建产品功能树，建立气流参数动态特性、换热动态仿真、换气动态仿真、动力系统运行控制、风洞速压控制、模型姿态控制、风洞运行控制等 7 个专业功能模型；最后结合需求模型与功能模型，采用建模工具构建风洞的逻辑架构图与物理架构图等。相关视图系统可呈现出风洞各系统之间的内在逻辑联系和各物理部件的输入输出关系，从多个角度反映风洞各系统的关系。同时，在架构设计的各环节中，开展创成式设计与系统级仿真，生成多种架构方案并进行评估择优，验证方案的可实现性。采用上述流程，生成 4 个了风洞架构方案，方案收敛评审时间减少了 40%，大幅提升了风洞概念设计的质量和效率。

2)各领域子系统设计

基于系统模型的物理架构，定义各领域子系统架构。在此基础上，开展气动与噪声、洞体结构、测控系统等子系统的设计与仿真，并结合设计空间探索技术，形成多种设计方案，开展多方案的设计、优化与决策。最终确定某风洞采用回流式总体布局，采用阵列风扇作为驱动系统，具备声学试验能力，配置 3 个可更换试验段，以实现跨尺度模型试验能力的覆盖；采用合理的整流装置，确保风洞流场品质和背景噪声指标的实现。

3)装配制造

利用设计 MBD 模型和工程 MBD 模型，建立装配对象、装配环境和装配资源模型，拟定装配方案，明确装配顺序与路径，推演模拟装配过程，检验设备的可行运动空间和可操作性，实现风洞试验段更换、试验准备流程仿真。在加工工艺方面，对加工方法、加工工序、加工质量控制要求、加工检测方法、加工设备、分工及技术路线、容差分布与分析、工艺技术准备等工艺信息进行分析描述，形成工艺模型，实现工艺数字化。

4)调试

基于各领域子系统模型和调试测试数据，快速高效地开展机电液控一体化、风洞速压控制、动力系统运行控制、模型姿态控制、风洞运行控制等虚拟调试。该方式预计可缩短风洞调试周期 30% 以上、减少调试故障率 90% 以上、降低调试成本 50% 以上。

5)运维

基于数字交付样机，对关键部段的性能进行实时预测及可视化展示，实现设备运行的可视化监控管理及运维，提高设备运行的可靠性。针对某风洞试验类型多，试验运行流程多变且复杂的现实情况，基于虚实结合的数字孪生模型，开展风洞试验运行的流程模拟，操作培训和智能交互式运维。

在某风洞研制中，全面采用基于 MBSE 的数字化研制模式，按照上述业务流程，构建需求模型、功能模型、物理模型、性能模型、工艺模型、制造模型、装配模型和运行模型等。经实践检验，基于 MBSE 的数字化研制模式将需求管理贯穿产品研制全生命周期，可确保需求的有效传递；以模型为唯一载体和依据，可保证模型的权威性和一致性；利用虚实融合的海量数据开展健康管理与智能运维，可实现数据的有效利用。某风洞设计阶段的实践证明：基于 MBSE 的数字化研制模式有助于获得更具创新性的方案，能够有效管控研制风险，减少工程变更、减少评审次数及时间，使装备全生命研制周期缩短 30% 以上、研制成本降低 20% 以上，并显著提升了装备运维效能。具体成效对比如图 4 所示。

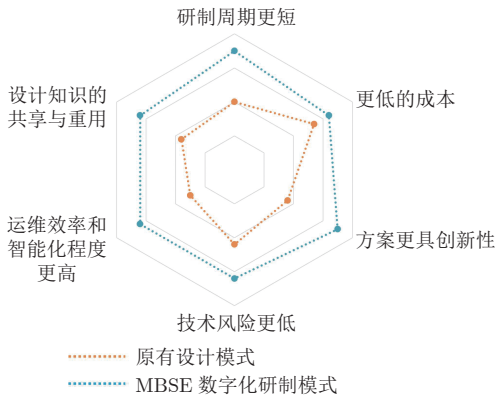


图 4 成效对比

Fig. 4 Comparative analysis of effectiveness

4 数字化协同设计平台建设

为持续提升数字化协同设计与仿真平台能力，满足空气动力装备与新概念飞行器基于 MBSE 的数字化研制需求，支持各类装备快速高质量迭代设计，支撑装备全链路数字化设计转型，本节进一步构建

了开放共享的数字化协同设计与仿真平台，其总体架构如图 5 所示。

该平台包括用户层、业务应用层、技术支撑层、信息集成层和物理硬件层 5 个层级，可以实现不同专业领域和系统层级的协同设计与仿真、三维可视化及知识数据管理。其具体功能定位可以总结为以下 4 点：

1)协同设计平台

风洞等大型复杂装备研制涉及气动、结构、控制、测量、液压等学科，需多专业人员协同合作，平台应具备分布式协同设计能力。

2)集成仿真平台

基于 MBSE 的数字化研制模式在整个设计周期需要借助 CFD 仿真、有限元分析、动态特性仿真以及多学科优化等多种仿真工具，平台应具备多种仿真能力，以实现对系统模型的验证与优化。仿真得到的数据可在平台中共享。基于国内软件的技术能力与风洞设计现状，目前部分仿真软件采用国外产

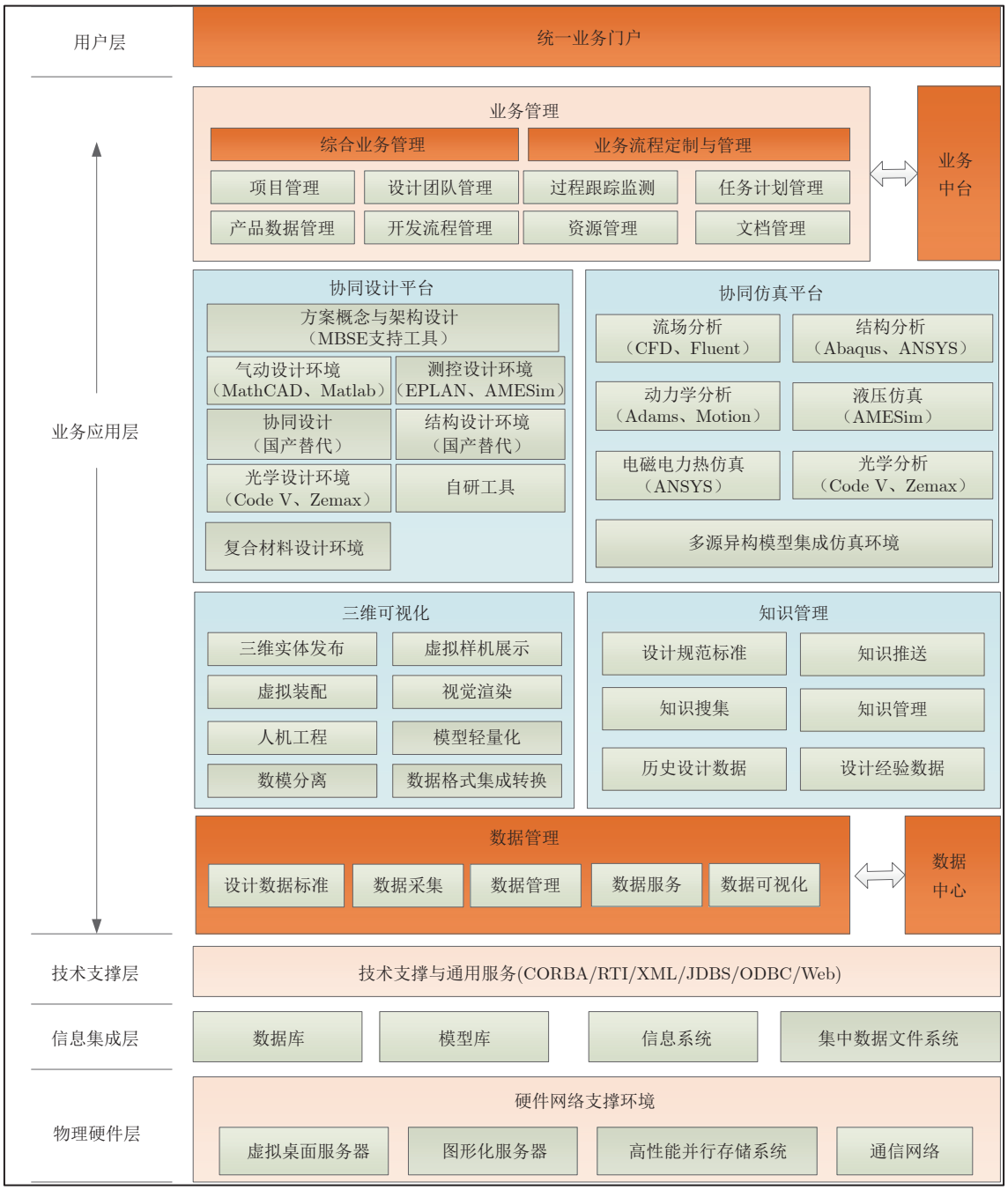


图 5　平台总体架构

Fig. 5　Overall architecture of the platform

品，后续将随着国内软件技术的发展逐步进行国产化替代。

3)数据管理平台

风洞设计过程产生海量数据和模型，平台应具备规范、有效、安全、系统的数据管理能力，以及进行挖掘数据形成知识的能力，从而实现风洞的智能运维。

4)知识服务平台

设计知识是设计单位最重要的资源，平台应具备高效、科学的知识组织与管理能力，以提升设计能力，缩短研制周期。

5 结 论

本文基于MBSE方法探索了风洞数字化研制模式的构建与实现。介绍了数字化设计、数字化建设和数字化运维三大流程，重点分析了需求驱动、模型驱动和数据驱动三大内涵。以某大型风洞为例，介绍了数字化研制模式下的典型业务场景。为实现基于MBSE的研制模式，构建了协同设计与仿真平台。这些探索有助于进一步提升风洞数字化研制水平，并为其他复杂装备的数字化研制模式构建提供参考。

参考文献：

[1] 钱学森. 论系统工程[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1982.

[2] NASA. NASA systems engineering handbook[M]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2017.

[3] GRAIGNIC P, VOSGIEN T, JANKOVIC M, et al. Complex system simulation: proposition of a MBSE framework for design-analysis integration[J]. Procedia Computer Science, 2013, 16: 59-68.
doi: 10.1016/j.procs.2013.01.007

[4] ESTEFAN J A. MBSE methodology survey[J]. Insight, 2009, 12(4): 16-18.
doi: 10.1002/inst.200912416

[5] ESTEFAN J A. 基于模型的系统工程 (MBSE) 方法论综述 [M]. 张新国, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.

[6] 邵健. 基于MBSE的航天任务分析与设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
SHAO J. Pace mission analysis and design method based on MBSE[D]. Harbin: Harbin Institue of Technology, 2015.
doi: 10.7666/d.D755875

[7] 武新峰, 彭祺擘, 黄冉, 等. 基于MBSE的运载火箭上升段逃逸救生策略[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(4): 1121-1126.
WU X F, PENG Q B, HUANG R, et al. Escape and rescue strategy of launch vehicle ascending section based on MBSE[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(4): 1121-1126.
doi: 10.12305/j.issn.1001-506X.2023.04.20

[8] INCOSE. INCOSE SE Vision 2020[R/OL]. [2023-06-20]. https://sebokwiki.org/wiki/INCOSE_Systems_Engineering_Vision_20202007.

[9] FANG Z G. Digital twin of complex equipment system: Empowering model-based forward R&D and collaborative innovation [M]. Beijing: China Machine Press, 2021.

[10] 刘政崇. 风洞结构设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.

[11] 廖达雄, 孙运强, 吴静怡, 等. 大型风洞设备的数智化初步研究[J]. 实验流体力学, 2022, 36(1): 1-10.
LIAO D X, SUN Y Q, WU J Y, et al. Digital intelligent technology research of large wind tunnel equipment[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2022, 36(1): 1-10.
doi: 10.11729/syltlx20210072

[12] 廖达雄, 黄知龙, 陈振华, 等. 大型低温高雷诺数风洞及其关键技术综述[J]. 实验流体力学, 2014, 28(2): 1-6.
LIAO D X, HUANG Z L, CHEN Z H, et al. Review on large-scale cryogenic wind tunnel and key technologies[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(2): 1-6.
doi: 10.11729/syltlx20130102

[13] CATTAFESTA L, BAHR C, MATHEW J. Fundamentals of wind tunnel design[M]//BLOCKLEY R, SHY R. Encyclopedia of Aerospace Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
doi: 10.1002/9780470686652.eae532

[14] CERMAK J E. Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(3): 355-370.
doi: 10.1016/S0167-6105(02)00396-3

[15] 张新国. 新一轮工业革命与中国航空工业的发展[N]. 中国航空报, 2014-01-18(2).

[16] US Department of Defense. Digital engineering strategy [R/OL]. [2023-06-20]. https://www.nist.gov/system/files/documents/2019/04/05/10_zimmerman_destrategyimp_nist_mbe_summit_vf.pdf.

[17] European Commission. Horizon 2020[EB/OL]. [2023-06-20]. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en.

[18] 王小军, 陈海东. 运载火箭数字样机工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2017.

[19] 石小林, 王为. 数字空间站建设及其应用[J]. 航天器工程, 2022, 31(6): 76-85.
SHI X L, WANG W. Digital space station and its application[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(6): 76-85.
doi: 10.3969/j.issn.1673-8748.2022.06.011



作者简介：

闫喜强（1987—），男，甘肃定西人，博士，副研究员。研究方向：风洞结构设计，基于模型的系统工程，多学科优化与仿真等。

E-mail: 707348278@qq.com

（编辑：宋嘉慧）