

虚拟试飞验证技术研究与应用展望

赵亮, 李金达, 孙之洋

中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089

DOI: 10.61369/TACS.2025120018

摘 要 : 虚拟试飞验证技术是航空装备研制领域的核心数字化技术, 其核心框架为搭建高保真虚拟样机与全维度飞行场景, 整合多物理场仿真、实时数据交互等技术手段, 完成飞机飞行性能、系统功能及制造质量的数字化验证, 从而突破传统物理试飞在周期、成本与场景覆盖方面的局限性。本文梳理了虚拟试飞验证技术的发展脉络与核心要义, 深入分析了支撑该技术落地的关键技术体系, 系统归纳了技术在航空装备研制各环节的典型应用场景, 剖析了当前技术发展面临的核心瓶颈, 最后对未来技术演进方向进行展望, 旨在为虚拟试飞验证技术的工程化应用与迭代升级提供理论参考。

关 键 词 : 虚拟试飞; 验证技术; 数字孪生; 多物理场仿真; 航空装备研制

Research on Virtual Flight Test Verification Technology and Its Application Prospect

Zhao Liang, Li Jinda, Sun Zhiyang

AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an, Shaanxi 710089

Abstract : Virtual flight test verification technology is a core digital technology in the field of aviation equipment research and development. Its core framework involves constructing high-fidelity virtual prototypes and full-dimensional flight scenarios, integrating technical means such as multi-physics field simulation and real-time data interaction to complete the digital verification of aircraft flight performance, system functions, and manufacturing quality, thereby breaking through the limitations of traditional physical flight tests in terms of cycle, cost, and scenario coverage. This paper sorts out the development context and core essence of virtual flight test verification technology, conducts an in-depth analysis of the key technical system supporting the implementation of this technology, systematically summarizes the typical application scenarios of the technology in various links of aviation equipment research and development, analyzes the core bottlenecks faced by the current technological development, and finally looks forward to the future direction of technological evolution. It aims to provide theoretical reference for the engineering application and iterative upgrading of virtual flight test verification technology.

Keywords : virtual flight test; verification technology; digital twin; multi-physics simulation; aerospace equipment development

引言

航空装备研制具有技术密集、流程复杂、安全标准严苛的特点, 试飞验证作为装备性能确认、风险排查的核心环节, 直接关系到装备研制的成败与交付周期。传统物理试飞依赖实体样机的制造与测试, 存在研制周期漫长、经济成本高昂、极端场景验证难度大(如高超音速飞行、强电磁干扰、极端气象等高危场景)、风险管控难度突出等固有缺陷, 已难以适配现代航空装备快速迭代、高可靠性与低成本研制的发展需求^[1]。

伴随数字孪生、人工智能、实时计算等前沿技术与航空工业的深度融合, 虚拟试飞验证技术随之诞生。该技术以“物理实体-虚拟映射-仿真验证-优化迭代”为核心框架, 在虚拟空间中复现飞机全生命周期的飞行状态与系统运行过程, 能够提前识别设计缺陷、制造偏差与系统协同问题, 构建“虚拟验证先行、物理试飞补位”的新型研制模式。开展虚拟试飞验证技术研究, 对推动航空装备研制的数字化转型、提升研制效率与质量、降低研制风险具有重要战略价值, 已成为全球航空工业竞争的核心技术高地^[2]。

一、虚拟试飞验证技术关键支撑技术

障验证过程的精准性与时效性^[3]。

(一) 高保真数字孪生建模技术

虚拟试飞验证技术的落地依赖多领域技术的协同支撑, 核心支撑技术主要包含四类, 各类技术相互衔接、缺一不可, 共同保

高保真数字孪生建模是虚拟试飞验证的基础, 需实现对物理飞机的全维度、高精度复刻, 具体涵盖几何、物理、行为三个

维度：

1. 几何建模：整合飞机设计图纸、制造工艺数据、激光扫描实测数据，采用参数化建模与逆向建模相结合的方式，构建包含机身、机翼、尾翼、发动机、系统组件等全结构的几何模型，将几何误差控制在0.05%—0.1%的范围内，确保模型结构尺寸与物理飞机高度一致。

2. 物理建模：融入材料特性（如强度、韧性、导热性）、制造工艺影响（如焊接应力、装配间隙）、组件运行机理（如发动机推力特性、舵面运动规律），通过物理参数校准与实测数据拟合，保障虚拟样机的力学、电气、热力等物理特性与物理飞机相匹配^[4]。

3. 行为建模：基于飞机飞行力学原理与系统控制逻辑，构建虚拟样机的飞行行为模型，还原起飞、巡航、降落、机动等不同阶段的运动规律，以及系统组件间的协同交互行为，确保虚拟样机的飞行状态与真实飞行场景保持一致。

（二）多物理场耦合仿真技术

飞机飞行过程是气动、机械、电气、热力、电磁等多物理场相互作用的复杂过程，多物理场耦合仿真技术需精准模拟各场域间的交互影响，是保障虚拟试飞验证结果真实性的核心技术：

1. 场域耦合建模：构建各物理场的数学模型（如气动场的N-S方程、机械场的动力学方程、电磁场的麦克斯韦方程），通过耦合接口实现各场域模型的数据交互，明确场域间的作用机制，例如气动载荷对结构的压力传递逻辑、电气信号对系统动作的驱动路径等。

2. 仿真引擎优化：采用并行计算、GPU加速等技术提升仿真效率，针对极端场景（如高超音速飞行的气动热力耦合、强电磁干扰下的航电系统运行）优化仿真算法，降低仿真误差，将多场耦合仿真结果与真实物理现象进行偏差控制。

3. 动态协同仿真：实现飞机结构、动力系统、航电系统、飞控系统等多组件的动态协同仿真，模拟各组件在多物理场作用下的运行状态，精准捕捉制造缺陷（如结构尺寸偏差）或系统故障（如信号延迟）引发的连锁反应。

（三）全场景虚拟飞行环境构建技术

虚拟飞行环境需复刻真实空域的地理、气象、电磁等环境要素，同时支持场景的灵活切换与极端场景的自定义构建，以满足多样化的试飞验证需求：

1. 地理环境构建：基于地理信息系统（GIS）数据，整合地形、地貌、空域边界、机场跑道等地理要素，搭建三维地理环境，还原不同起降场地与飞行空域的地理特征。

2. 气象环境构建：融合实时气象数据与历史气象统计数据，模拟微风、侧风、湍流、雨、雪、雷暴、高低温等常规气象条件，同时支持自定义极端气象场景（如大侧风、高温高湿高寒、强雷暴电磁干扰），覆盖物理试飞难以实现的极端环境验证需求。

3. 电磁环境构建：模拟地面通信基站、卫星、雷达等电磁信号源，搭建复杂电磁环境，还原高空、低空不同空域的电磁信号强度与干扰特性，满足航电系统抗电磁干扰验证需求。

（四）实时数据交互与虚实融合技术

实时数据交互是实现虚拟试飞与物理状态同步、虚实协同验证的关键，需保障数据传输的低延迟与高稳定性：

1. 数据采集与传输：通过传感器、数据采集终端采集物理飞机的制造数据、运行参数，依托5G、边缘计算技术，实现物理实体与虚拟样机、数据采集设备与仿真系统的实时数据传输，控制传输延迟确保仿真过程与真实状态同步。

2. 虚实数据校准：定期对比物理试飞数据、地面测试数据与虚拟试飞仿真数据，校准虚拟样机参数与仿真模型，提升虚拟试飞验证结果的准确性。

3. 虚实协同控制：支持通过物理操控设备（如模拟驾驶舱）控制虚拟样机飞行，或依据虚拟试飞结果指导物理样机的测试调整，形成“虚拟仿真—物理测试—参数优化”的闭环协同机制，提升整体验证效率。

二、虚拟试飞验证技术的典型应用场景

虚拟试飞验证技术贯穿航空装备研制全流程，从设计阶段到服役阶段均有广泛应用，核心应用场景集中在以下三个阶段，可有效解决各阶段的验证痛点。

（一）设计阶段性能预验证

设计阶段是航空装备性能定型的关键环节，虚拟试飞验证可提前排查设计缺陷，降低设计迭代成本：

1. 气动性能预验证：模拟不同飞行速度、高度、姿态下的气动载荷分布，验证升力、阻力、力矩等气动指标是否符合设计要求，优化机身、机翼的气动外形。例如，通过虚拟试飞调整机翼弯扭角度，可使飞行阻力降低10%—15%。

2. 结构强度预验证：结合多场耦合仿真，模拟飞行过程中结构的受力状态，验证机身、机翼、尾翼等关键部件的强度、刚度是否达标，提前识别设计薄弱环节（如局部应力集中问题），优化结构设计方案，避免后续制造与试飞阶段的重大调整。

3. 系统功能预验证：构建航电、飞控、动力等核心系统的虚拟模型，模拟系统在设计参数下的运行状态，验证系统功能的完整性与协同性。例如，测试飞控系统的姿态控制精度、航电系统的信号传输稳定性，进而优化系统控制逻辑。

（二）制造阶段质量验证

制造阶段的质量偏差可能影响飞机飞行安全，虚拟试飞验证可实现制造质量的精准校验与风险评估：

1. 装配质量验证：通过对比虚拟样机与物理飞机的装配数据，自动识别装配干涉、间隙超标、安装角度偏差等问题。例如，验证机身蒙皮与梁架的装配平整度、发动机与机身的连接同轴度，避免因装配缺陷导致气动性能下降或结构强度不足。

2. 部件制造质量验证：针对机翼梁架、发动机叶片等关键结构件，通过虚拟试飞模拟其在飞行载荷下的运行状态，验证3D打印、锻造、焊接等制造工艺对部件性能的影响，判断部件制造质量是否满足飞行需求。例如，验证3D打印发动机叶片的疲劳强度是否达到设计标准。

3. 制造缺陷风险评估：针对识别出的制造偏差，通过仿真分析其对飞行性能的影响程度。例如，模拟机翼尺寸偏差对飞行姿态稳定性的影响、连接件间隙对结构振动的影响，明确缺陷风险等级，制定针对性的整改方案。

（三）试飞阶段功能与风险验证

试飞阶段是装备交付前的最终验证环节，虚拟试飞验证可补充物理试飞的不足，提升验证覆盖度与安全性：

1. 常规试飞项目替代验证：针对起飞性能、巡航稳定性、降落精度等常规试飞项目，通过虚拟试飞提前完成多次验证，优化试飞参数，减少物理试飞次数，使试飞周期缩短30%—40%。

2. 极端场景风险验证：模拟强侧风、雷暴、高空失速、发动机失效等极端场景与故障场景，测试飞机的应急响应能力与安全性。例如，验证发动机单台失效后，飞控系统能否快速调整姿态以保障飞机安全降落。此类场景难以通过物理试飞实现，且虚拟试飞不存在实体安全风险。

3. 试飞故障追溯与优化：若物理试飞中出现故障，可通过虚拟试飞复现故障场景，模拟不同参数调整对故障的影响，定位故障根源（如设计缺陷、制造偏差、系统协同问题），制定优化方案并在虚拟空间验证效果，再将方案应用于物理飞机整改，降低故障整改成本与周期。

三、虚拟试飞验证技术现存瓶颈

尽管虚拟试飞验证技术已在航空装备研制中广泛应用，但仍面临四大核心瓶颈，制约技术的进一步升级与工程化落地。

（一）建模精度与仿真效率的平衡难题

飞机结构与系统组件的复杂性，决定了全维度高保真建模需要海量数据支撑，这导致虚拟样机模型的复杂度极高，占用大量计算资源，大幅降低仿真效率。高保真模型的单场仿真时间可能长达数小时甚至数天，多场耦合仿真的耗时更长，难以满足航空装备快速迭代的验证需求；若通过简化模型提升仿真效率，则会导致建模精度下降，影响验证结果的真实性。如何在保证精度的前提下优化模型复杂度、提升仿真效率，是当前技术发展的核心瓶颈。

（二）多物理场耦合仿真精度不足

针对高超音速飞行的气动热力强耦合、强电磁干扰下的多系统协同运行等极端场景，现有多物理场耦合仿真的数学模型难以完全还原复杂的物理机制，仿真算法存在局限性，导致仿真结果与真实物理现象存在一定偏差，部分场景的偏差较大。同时，各物理场的耦合接口兼容性不足，数据交互存在延迟或丢失问题，进一步降低了耦合仿真精度，难以满足高超音速飞行器的高端航空装备的极端场景验证需求。

（三）数据质量与完整性受限

虚拟试飞验证依赖设计、制造、实测、试飞等多源数据，当前数据采集存在两大突出问题：一是材料微观缺陷、制造过程中的隐性应力、极端环境下的系统运行参数等隐性数据难以采集，数据缺失导致虚拟样机的物理特性与行为特性还原不充分；二是

多源数据格式不统一、标准不一致，数据融合与校准难度大，存在数据冗余或误差，影响虚拟建模与仿真验证的精准性。

（四）工程化落地标准缺失

虚拟试飞验证技术的工程化应用缺乏统一标准，主要体现在三个方面：一是虚拟样机的建模精度、仿真模型的验证规范尚未统一，不同单位的建模与仿真标准差异较大，导致验证结果的可比性与可信度不足；二是虚拟试飞与物理试飞的项目划分、替代比例无明确标准，难以科学界定虚拟试飞的应用范围；三是虚拟试飞数据的管理、追溯与共享机制不完善，数据安全性与复用性不足，制约了技术的规模化应用。

四、虚拟试飞验证技术未来发展方向

针对当前技术瓶颈，结合前沿技术发展趋势，虚拟试飞验证技术未来将向智能化、虚实深度融合、全生命周期覆盖、跨领域融合四大方向演进，进一步提升技术的精准性、效率与应用范围。

（一）智能化升级：AI 赋能建模与仿真全流程

将人工智能与机器学习技术融入虚拟试飞验证全流程，实现技术的智能化优化：

1. 智能建模：通过 AI 算法自动识别模型冗余部分，在保证精度的前提下简化模型结构，提升建模效率；基于历史建模数据与实测数据训练算法模型，实现建模参数的自动校准，减少人工干预成本。

2. 智能仿真：利用 AI 算法优化多场耦合仿真算法，提升极端场景的仿真精度；基于历史仿真数据预测仿真结果，动态调整仿真参数，缩短仿真时间。

3. 智能分析：借助 AI 技术自动分析虚拟试飞数据，识别缺陷与风险点，生成优化建议，提升数据处理与决策效率，构建“仿真—分析—优化”的自动化闭环。

（二）虚实深度融合：构建一体化试飞验证体系

打破虚拟试飞与物理试飞的技术边界，搭建“虚拟样机+物理样机”的虚实深度融合试飞验证体系：

1. 实时虚实联动：依托5G+边缘计算+数字孪生技术，实现虚拟试飞与物理试飞的实时同步，虚拟样机可动态接收物理样机的运行数据，物理样机可根据虚拟试飞结果实时调整测试参数。

2. 项目协同验证：科学划分虚拟与物理试飞项目，高风险、极端场景项目以虚拟试飞为主，核心性能、关键指标项目以物理试飞为主，两者结果相互校准、互补，提升整体验证的可靠性。

3. 数字孪生全生命周期应用：将虚拟样机的应用延伸至航空装备服役阶段，基于服役过程中的实时运行数据动态更新虚拟样机，通过虚拟试飞模拟服役过程中的故障风险，实现预测性维护，拓展虚拟试飞技术的应用场景。

（三）全生命周期覆盖：从研制到服役的全流程验证

突破当前虚拟试飞集中于研制阶段的局限，实现航空装备全生命周期的虚拟验证覆盖：

1. 设计阶段：提前介入概念设计环节，通过虚拟试飞验证不同设计方案的可行性，缩短设计迭代周期。
2. 制造阶段：融入智能制造技术，实现制造过程与虚拟试飞验证的同步推进，实时校验制造质量，减少返工率。
3. 服役阶段：基于虚拟样机开展服役状态监测、故障诊断与寿命预测，通过虚拟试飞模拟维修后的性能恢复情况，优化维修方案。
4. 退役阶段：借助虚拟试飞评估退役装备的残余性能，为装备拆解、回收或改造提供数据支撑。

五、结论

虚拟试飞验证技术是航空装备数字化研制的核心支撑技术，

其通过高保真数字孪生建模、多物理场耦合仿真等关键技术，搭建了“虚拟空间验证”的全新路径，在设计性能预验证、制造质量校验、试飞风险管控等场景中展现出周期短、成本低、风险小、覆盖广的显著优势，有效破解了传统物理试飞的诸多痛点，成为推动航空装备研制模式革新的关键力量。

尽管当前技术仍面临建模与仿真效率平衡、多场耦合精度不足、数据质量受限、工程化标准缺失等瓶颈，但随着人工智能、虚实融合、跨领域技术融合的持续推进，虚拟试飞验证技术将逐步实现智能化升级、全生命周期覆盖与工程化规模化应用，最终形成“虚实协同、智能高效、全流程覆盖”的试飞验证新模式，为航空装备的高质量、低成本、快速化研制提供有力支撑，助力全球航空工业向数字化、智能化转型迈进新台阶。

参考文献

[1] 波音公司. 777/787飞机研制中的数字化与虚拟技术应用 [J]. 国际航空, 过往期刊.

[2] 王向晖. 基于数字孪生的飞机装配精度分析与预测 [J]. 航空学报, 2020.

[3] 张新国. 基于模型的系统工程 (MBSE) 实践指南 [M]. 机械工业出版社, 2022.

[4] 李浩. 实时仿真技术在航空电子系统虚拟集成中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2019.