

基于数字孪生的民用客机首飞风险预测与试飞数据实时校验技术研究

陈堂辉 聂通 屈一帅

中航工业陕西飞机工业有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17153

[摘要] 民用客机首飞是型号研制过程中最关键的里程碑之一,其高风险性、高复杂性和高成本性对飞行安全和项目进度构成严峻挑战。传统试飞方法依赖经验判断与离线数据分析,难以实现对潜在风险的早期预警与动态干预。本文提出一种基于数字孪生(DigitalTwin,DT)技术的民用客机首飞风险预测与试飞数据实时校验新方法。首先,构建涵盖气动、结构、航电、飞控等多物理场耦合的高保真度飞机数字孪生体;其次,融合历史试飞数据、仿真模型与实时遥测信息,建立动态更新的风险预测模型;再次,设计基于模型-数据双驱动的试飞数据实时校验机制,实现对异常数据的自动识别与修正建议;最后,通过某型国产支线客机首飞任务的仿真验证,证明所提方法在提升首飞安全性、缩短试飞周期、降低试飞成本方面具有显著优势。本研究为民用航空器智能化试飞体系构建提供了理论支撑与技术路径。

[关键词] 数字孪生; 民用客机; 首飞; 风险预测; 试飞数据

中图分类号: V321.2 **文献标识码:** A

Research on Risk Prediction for Civil Aircraft First Flight and Real-Time Flight Test Data Verification Technology Based on Digital Twin

Tanghai Chen Tong Nie Yishuai Qu

AVIC Shaanxi Aircraft Industry (Group) Co., Ltd.

[Abstract] The first flight of a civil aircraft represents one of the most critical milestones in the model development process, characterized by high risk, complexity, and cost, posing significant challenges to flight safety and project scheduling. Traditional flight test methods, which rely on empirical judgment and offline data analysis, struggle to achieve early warning and dynamic intervention for potential risks. This paper proposes a novel approach based on Digital Twin (DT) technology for risk prediction during the first flight of civil aircraft and real-time verification of flight test data. First, a high-fidelity aircraft digital twin is constructed, incorporating multi-physics field coupling such as aerodynamics, structures, avionics, and flight control. Second, a dynamically updated risk prediction model is established by integrating historical flight test data, simulation models, and real-time telemetry information. Third, a model-data dual-driven real-time flight test data verification mechanism is designed to enable automatic identification of abnormal data and provide correction suggestions. Finally, simulation validation based on the first flight mission of a domestic regional airliner demonstrates that the proposed method offers significant advantages in enhancing first flight safety, shortening the flight test cycle, and reducing testing costs. This research provides theoretical support and a technical pathway for the development of an intelligent flight test system for civil aircraft.

[Key words] Digital Twin; Civil Aircraft; First Flight; Risk Prediction; Flight Test Data

引言

民用航空工业是国家高端制造业的重要标志,其发展水平直接反映一个国家的综合国力与科技实力。作为型号研制的关

键节点,首飞不仅验证飞机基本飞行能力,更是对全机系统集成性能的首次全面检验。传统试飞流程主要依赖“设计—制造—地面试验—试飞—数据分析—迭代优化”的线性模式。该模式

存在三大瓶颈: 一是风险识别滞后, 依赖事后分析, 难以实现事前预警; 二是试飞数据校验依赖人工经验, 效率低且易出错; 三是试飞架次多、周期长、成本高, 难以满足现代航空快速迭代的需求。近年来, 数字孪生技术作为连接物理世界与信息空间的桥梁, 在智能制造、智慧城市等领域展现出巨大潜力。数字孪生通过构建物理实体的虚拟映射, 实现状态感知、过程模拟、决策优化与闭环控制。将其引入航空试飞领域, 有望突破传统模式的局限, 实现“虚实互动、以虚控实、以虚优实”的智能化试飞新范式。

1 数字孪生技术在航空试飞中的应用框架

1.1 数字孪生体构建

数字孪生体是物理飞机在信息空间的高保真虚拟映射, 其核心在于多尺度、多物理场、多维度建模。针对民用客机首飞需求, 本文构建的数字孪生体从几何表征出发, 逐步深化至物理行为与知识规则层面。首先, 基于高精度CAD模型构建包含机身、机翼、尾翼及起落架等部件的三维几何体, 该模型不仅用于可视化展示, 更是后续气动网格划分与结构有限元分析的基础。在此基础上, 集成多学科物理模型: 气动模型采用雷诺平均Navier-Stokes (RANS) 方程结合风洞试验数据修正, 形成覆盖宽速域的气动数据库; 结构动力学模型基于有限元法构建全机结构, 充分考虑材料非线性、连接刚度及颤振边界; 飞控系统模型则完整复现控制律逻辑、作动器动态响应与传感器噪声特性; 航电与能源子系统亦被纳入统一框架, 以模拟供电、通信与导航功能的耦合行为。

进一步地, 上述物理模型被集成于六自由度非线性飞行动力学方程中, 形成能够准确描述飞机空中运动状态的行为模型。为增强系统的智能性, 数字孪生体还嵌入了适航规章 (如CCAR-25部)、历史试飞案例库及典型故障模式库等先验知识, 使其不仅具备“仿真”能力, 更具备“推理”与“决策”潜力。这种多层次、多维度的建模策略, 确保了数字孪生体在首飞场景下既能反映飞机的宏观飞行特性, 又能捕捉关键子系统的微观异常。

1.2 数据融合与交互机制

数字孪生体的生命力在于与物理飞机的实时数据交互。为实现高效、低延迟的信息同步, 本文采用“边缘-云”协同架构。在边缘层, 试飞飞机搭载的机载数据采集系统通过ARINC429总线、以太网等高速接口实时采集空速、高度、姿态角、舵面偏角、发动机转速等关键参数, 并经由卫星链路或地面遥测站上传至云端平台^[1]。在云端层, 系统首先利用精确时间协议 (PTP) 对遥测数据进行时间对齐, 确保其与数字孪生体内部时钟同步; 随后, 采用数据同化技术 (如扩展卡尔曼滤波EKF) 将实测数据融入仿真模型, 动态修正气动系数、质量分布或传感器偏差等不确定参数, 从而持续提升虚实一致性。这种双向闭环的数据流机制, 使得数字孪生体不再是静态的“数字拷贝”, 而是随飞行进程不断演化的“活体镜像”, 为后续风险预测与数据校验奠定坚实基础。

2 首飞风险预测模型

2.1 风险因子识别

基于适航条款与历史事故分析, 本文将首飞风险因子归纳为四类: (1) 设计类风险: 如气动中心偏移、操纵面效率不足、结构强度裕度不足; (2) 制造类风险: 如装配误差、材料缺陷、线缆接错; (3) 环境类风险: 如风切变、湍流、结冰; (4) 操作类风险: 如飞行员误操作、应急程序执行错误。

2.2 多源信息融合的风险预测

为实现对上述风险的动态评估, 本文构建了一个融合先验知识、历史数据与实时状态的多源信息融合框架。其中, 先验知识来源于设计阶段的高保真仿真与地面台架试验, 提供确定性的性能边界; 历史数据则来自同类机型或相似构型的试飞记录, 蕴含丰富的经验规律; 实时状态由当前飞行遥测数据提供, 反映物理飞机的真实行为^[2]。在此基础上, 选用贝叶斯网络 (Bayesian Network, BN) 作为风险推理引擎。BN通过有向无环图结构显式表达风险事件间的条件依赖关系, 其节点代表具体风险 (如“失速”、“结构超载”), 边表示因果或相关性。节点的先验概率通过蒙特卡洛仿真或专家评估获得, 而在飞行过程中, 系统依据实时遥测数据不断更新各节点的后验概率, 实现风险等级的滚动预测。例如, 当空速持续下降而迎角迅速增大时, BN会显著提升“临近失速”节点的概率, 并联动评估“飞行员能否及时改出”的操作风险, 从而生成综合预警信号。

2.3 动态风险地图生成

为便于试飞指挥团队直观掌握风险态势, 系统将贝叶斯网络的推理结果转化为可视化动态风险地图。该地图以飞行剖面为横轴 (涵盖滑跑、抬轮、离地、爬升、转弯、着陆等关键阶段), 以风险类型为纵轴, 采用红-黄-绿三色梯度表示风险等级。地图随飞行进程实时刷新, 不仅显示当前风险热点, 还可基于趋势外推未来10-30秒的风险演化。指挥员可据此动态调整试飞科目顺序, 例如跳过高风险机动、提前返航或启动应急预案。这种“看得见的风险”极大提升了决策的科学性与时效性, 是传统试飞指挥模式的重要升级。

3 试飞数据实时校验技术

3.1 校验必要性与挑战

试飞数据质量直接影响型号决策。然而, 实际试飞中常因传感器故障、电磁干扰、数据链丢包等原因导致数据异常。传统校验依赖试飞工程师人工比对, 效率低下且主观性强。数字孪生为数据校验提供了“黄金标准”——虚拟模型输出的理论值可作为参考基准。但挑战在于: 模型存在简化误差, 且无法完全覆盖所有工况。

3.2 模型-数据双驱动校验机制

本文提出一种双驱动校验机制, 结合模型预测与数据驱动方法:

3.2.1 模型驱动校验

利用数字孪生体实时仿真当前飞行状态, 输出理论参数 $\hat{y}_m(t)$; 计算实测值 $y(t)$ 与 $\hat{y}_m(t)$ 的残差 $e_m(t) = y(t) - \hat{y}_m(t)$; 若 $|e_m(t)| > \sigma_m$ (模型不确定性阈值), 则标记为可疑。

3.2.2 数据驱动校验

构建基于长短期记忆网络(LSTM)的时序预测模型,利用历史正常数据训练;输出数据驱动预测值 $\hat{y}_d(t)$,计算残差 $e_d(t) = y(t) - \hat{y}_d(t)$;若 $|e_d(t)| > \sigma_a$,则标记为异常。

3.2.3 融合决策

采用D-S证据理论融合两类残差证据,计算异常置信度 $Bel(\text{abnormal})$;若 $Bel(\text{abnormal}) > \tau$ (阈值),则判定数据异常,并启动修正流程。

3.3 异常数据修正与溯源

对于判定异常的数据,系统提供两种处理策略:一是插值修正:若为瞬时跳变,采用前后有效值线性插值;二是模型替代:若传感器持续失效,则用数字孪生体输出值临时替代,并标注“模型推演”标签。同时,系统记录异常事件,关联可能原因(如“大气数据探头结冰”、“加速度计漂移”),形成故障知识库,用于后续维护与设计改进。

4 仿真验证与案例分析

4.1 实验设置

以某型国产70座级支线客机(代号MA-70)首飞任务为背景,选取典型首飞剖面:滑跑—抬轮—离地—初始爬升—小角度转弯—返场着陆。构建其数字孪生体,包含:

CFD气动数据库(覆盖0.1-0.8马赫);

全机FEM模型(节点数>50万);

非线性飞控模型(含包线保护逻辑);

真实遥测数据链模拟器。

注入两类典型异常:

风险场景:模拟右侧升降舵卡阻(制造缺陷),导致俯仰控制能力下降;

数据异常:人为注入空速传感器阶跃跳变(+20节)。

4.2 风险预测效果

在升降舵卡阻场景中,飞机离地后因右侧升降舵无法响应指令,导致俯仰力矩不对称。数字孪生体在离地后约30秒即通过姿态角速率与舵面指令的不匹配检测到异常,贝叶斯网络迅速将“俯仰失控”风险概率从基线0.02提升至0.78,并联动评估“结构过载”与“飞行员改出能力”等次生风险。系统提前45秒发出红色预警,试飞指挥员据此指令飞行员中止原定转弯科目,立即改平返航,成功规避潜在失事。相较仅依赖固定阈值告警的传统方法,本文方法不仅预警时间大幅提前,且通过多风险耦合分析降低了误报率,验证了其在复杂故障场景下的优越性。

4.3 数据校验效果

在空速跳变场景中,错误的空速信号导致飞控系统误判飞行状态,自动增大迎角以维持升力,进而引发高度异常爬升。此

时,模型驱动校验因飞机动态响应偏离理论轨迹而产生大残差;数据驱动校验则因LSTM模型从未见过此类突变而输出平稳预测,同样产生显著残差。D-S证据理论融合两类证据后,异常置信度迅速攀升至0.92,系统在2秒内判定空速数据异常,并建议切换至备用空速源。整个校验过程延迟低于1秒,准确率达98.5%,完全满足首飞实时监控需求。该案例表明,双驱动机制能有效识别并隔离传感器级故障,防止其误导飞行控制系统与地面决策。

5 讨论

本文所提方法在提升首飞安全性与试飞效率方面展现出显著优势。其前瞻性体现在将风险防控关口前移,实现从“被动响应”到“主动预防”的转变;其闭环性通过“感知—预测—校验—反馈”链条,支持动态试飞决策;其经济性则体现在减少无效架次、加速问题定位,预计可缩短首飞准备周期15%-20%。然而,当前研究仍存在一定局限^[3]。首先,数字孪生体的构建高度依赖高质量初始模型,对于采用全新气动布局(如翼身融合体)的未来机型,现有建模方法需进一步拓展;其次,高保真实时仿真对计算资源要求较高,目前主要依赖地面高性能服务器,尚难全部部署于机载边缘设备;此外,风险知识库的覆盖广度仍有提升空间,需通过更多试飞任务持续积累与迭代。

未来工作将围绕三个方向展开:一是引入强化学习机制,使数字孪生体能在与物理飞机的交互中自主优化模型参数,实现在线自进化;二是研发轻量化孪生模型与高效求解算法,推动核心功能向机载端迁移,提升系统鲁棒性与自主性;三是构建跨机型、跨平台的通用风险知识图谱,通过迁移学习提升模型对新型号的泛化能力,最终形成覆盖民机全生命周期的智能试飞生态体系。

6 结语

本文系统研究了基于数字孪生的民用客机首飞风险预测与试飞数据实时校验技术。通过构建高保真多物理场耦合数字孪生体,融合贝叶斯网络与深度学习方法,实现了对首飞风险的动态预测与试飞数据的智能校验。仿真验证表明,该方法能显著提升首飞安全性与试飞效率,为民机智能化试飞体系建设提供了可行路径。随着数字孪生技术的不断成熟,其在全生命周期航空器管理中的应用前景将更加广阔。

[参考文献]

[1]胡家亮,吴江鹏,霍思旭,等.基于颤振试飞数字孪生扫频数据重构的模式参数估计[J/OL].航空学报,1-11[2025-11-8].

[2]米毅,李爱军,温亚军,等.民用客机负加速度试飞实时预测及告警技术研究[J].西北工业大学学报,2024,42(02):295-302.

[3]李徐辉,魏士皓,李旻昊.民用飞机配电系统数字孪生建模与模型自更新技术[J/OL].航空工程进展,1-9[2025-11-8].