

面向航空发动机制造的数字孪生应用架构探索与实践

刘明¹ 齐野² 唐晓辉³

1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 辽宁 沈阳 110000

2. 空装驻沈阳地区第三军事代表室 辽宁 沈阳 110000

3. 空装驻沈阳地区第二军事代表室 辽宁 沈阳 110000

摘要：面向航空发动机制造，探索并实践数字孪生应用架构，该架构集成数据层、模型层、服务层及用户层，实现从设计到运维的全生命周期智能化管理。通过构建高精度仿真模型、优化设计与试验流程、提升制造加工精度与效率，显著增强航空发动机的研发能力与市场竞争力。实践表明，数字孪生技术是推动航空制造业转型升级的关键力量。

关键词：航空发动机制造；数字孪生；应用架构；实践

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术是一种前沿的计算机技术，它通过集成物理模型、传感器数据、运行历史等多源信息，在虚拟空间中构建与实体完全一致的数字模型。这种技术利用高精度的计算机模拟，实现了对现实世界中物体、流程或系统的精确映射，被誉为现实世界的“数字双胞胎”。数字孪生技术在产品设计、制造、工程、医疗、交通等多个领域展现了巨大的应用潜力。在制造业中，数字孪生帮助企业在产品研发阶段进行精确的模拟和仿真，从而缩短研发周期，降低成本，它还能实时监测生产线的运行状态，预测潜在风险，优化生产流程，推动智能制造的发展。在医疗领域，数字孪生技术为患者提供个性化的治疗方案，通过创建患者的数字孪生模型，医生可以更精确地诊断疾病，进行手术模拟，提高手术成功率，降低手术风险，数字孪生还应用于医学研究和新药开发，加速药物研发和临床试验进程。随着物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展，数字孪生技术也在持续进化。未来的数字孪生将更加智能化、多模态、联网化和自适应，能够更好地适应复杂多变的现实环境，为各行各业提供更加精准、高效的决策支持。

2 航空发动机制造的复杂性与重要性

航空发动机作为飞机的“心脏”，其制造过程复杂程度堪称工业制造领域的巅峰。这一复杂性的根源在于航空发动机集成了材料科学、热力学、流体力学、空气动力学、精密机械制造等多个学科领域的前沿技术^[1]。每一片涡轮叶片的铸造与加工，都需经历精密的工艺控制，确保其形状、尺寸及晶相结构达到极致标准。而发动机的组装，更是要求极高的精度与熟练度，很多环节仍需依赖技术工人的手工操作，以达到最佳性能。航空发动机的工作环境极为恶劣，需承受高温、高压、高转

速等极端条件，这对发动机的材料和结构提出了近乎苛刻的要求，在设计与制造过程中，必须充分考虑这些因素，确保发动机在各种极端环境下都能保持稳定可靠的运行。航空发动机的重要性不言而喻，作为飞机的核心动力装置，它不仅决定了飞机的飞行性能，更是航空技术发展的重要推手。

3 面向航空发动机制造的数字孪生应用架构设计

3.1 应用架构概述

面向航空发动机制造的数字孪生应用架构设计，旨在构建一个全面、集成且高度可扩展的框架，以支持从设计、制造、测试到运维全生命周期的智能化管理。该架构以数据为核心，通过多层次、模块化的设计，实现航空发动机复杂系统的精准映射与高效管理。总体框架包括四个核心层次：数据层、模型层、服务层及用户层，各层之间相互关联、协同工作，共同推动航空发动机制造向智能化、精准化方向发展。

3.2 数据层设计

数据层作为整个架构的基础，负责航空发动机全生命周期中各类数据的采集、存储、处理及传输，确保数据的准确性、实时性和安全性。具体设计方案如下：

(1) 数据采集：利用遍布航空发动机制造现场的各类传感器（如温度、压力、振动传感器等），以及设计软件、制造管理系统等产生的数据，实现多维度、全方位的数据收集，采用物联网（IoT）技术，实现数据的远程实时获取。(2) 数据存储：构建高性能、高可用性的数据仓库或分布式数据库系统，以支持海量数据的存储与查询。采用数据压缩、加密等技术，确保数据的安全性与隐私保护，设计合理的数据索引与查询策略，提高数据访问效率。(3) 数据处理：通过数据清洗、去重、转换等预处理步骤，提高数据质量。利用大数据处理框架

(如Hadoop、Spark等),实现大规模数据的快速分析与挖掘。引入机器学习算法,对数据进行深度分析,发现数据背后的隐藏规律与趋势。(4)数据传输:采用高效、可靠的数据传输协议(如MQTT、WebSocket等),实现数据的实时传输与同步。设计数据缓存机制,减少网络延迟与带宽占用,建立数据备份与恢复机制,确保数据传输过程中的数据安全与可靠性。

3.3 模型层构建

模型层是数字孪生应用架构的核心,负责构建航空发动机的数字模型,包括几何模型、物理模型、行为模型、规则模型等多种类型。利用CAD/CAM技术,构建航空发动机的三维几何模型,精确描述其外形结构、装配关系等。通过模型轻量化处理,提高模型的加载与渲染速度。基于热力学、流体力学、空气动力学等物理定律,建立航空发动机各部件的物理模型。通过数值仿真,模拟发动机在不同工况下的性能表现,如推力、油耗、温度分布等。描述航空发动机在特定条件下的动态行为特征,如启动、加速、减速、风险等。通过行为建模,模拟发动机在实际运行中的复杂动态过程,为风险预测与诊断提供依据。定义航空发动机制造、测试、运维等过程中的一系列规则与标准,如制造工艺规范、性能测试标准、风险处理流程等。规则模型有助于实现制造过程的标准化与自动化^[2]。

3.4 服务层功能

服务层是数字孪生应用架构中提供具体功能的层次,包括仿真服务、优化服务、预测服务等功能模块,支持航空发动机制造的全生命周期管理。基于模型层构建的各类模型,提供虚拟仿真环境。用户可以在此环境中对航空发动机进行模拟测试,评估设计方案的可行性与性能表现。仿真服务还支持多方案对比与优化设计,为制造决策提供科学依据。利用遗传算法、粒子群优化等优化算法,对航空发动机的设计参数、制造工艺等进行优化调整。通过反复迭代仿真与优化过程,找到最优的设计方案与制造策略,提高发动机的性能与可靠性。基于历史数据与实时监测数据,利用机器学习算法对航空发动机的未来状态进行预测。预测服务包括剩余寿命预测、风险预警、性能衰退趋势预测等,有助于提前发现潜在问题并采取相应措施,避免风险发生。

3.5 用户层交互

用户层是数字孪生应用架构中与用户直接交互的界面,负责提供直观、便捷的操作体验与数据分析展示。第一、界面设计:采用现代化的UI/UX设计理念,设计简洁、直观的操作界面。通过图形化展示、交互式操作

等手段,降低用户的学习成本与使用难度。第二、功能模块:根据用户需求,设计不同的功能模块,如数据查询、仿真模拟、优化分析、预测预警等。每个模块都提供丰富的功能选项与参数设置,满足不同用户群体的使用需求。第三、数据可视化:利用图表、仪表盘等可视化工具,将复杂的数据分析结果以直观的形式展现出来。用户可以通过可视化界面快速了解航空发动机的性能状态、风险预警等信息,为决策提供有力支持。第四、交互反馈:建立用户反馈机制,收集用户在使用过程中遇到的问题与建议。通过持续迭代与优化,不断提升数字孪生应用架构的用户体验与实用价值,为用户提供在线帮助与技术支持服务,确保用户能够顺利使用系统并充分发挥其效能。

4 数字孪生技术在航空发动机制造中的实践探索

4.1 设计阶段的应用

在航空发动机的设计阶段,数字孪生技术以其强大的仿真与预测能力,为设计者提供了前所未有的设计优化与验证手段。设计初期,工程师们利用CAD/CAM软件构建航空发动机的三维几何模型,这是数字孪生技术的基础。随后,基于这些几何模型,结合物理定律与工程经验,构建出包含材料属性、热力学特性、流体力学行为等多维度的物理模型。这些模型通过高精度的数值仿真算法,能够在虚拟环境中模拟发动机在不同工况下的运行状态,为设计提供详尽的性能预测数据^[3]。航空发动机是一个高度集成的复杂系统,包含燃油系统、润滑系统、冷却系统等多个子系统。在设计阶段,这些子系统之间的协同工作至关重要。数字孪生技术通过构建多系统联合仿真平台,实现了各子系统之间的无缝对接与协同仿真。工程师们可以在虚拟环境中模拟发动机启动、加速、减速、稳态运行等多种工况,观察各子系统之间的相互作用与影响,从而发现潜在的设计缺陷并进行优化。传统的设计验证方法往往依赖于物理原型机的制造与测试,这不仅成本高昂且周期长。而数字孪生技术则提供了一种更为高效、经济的验证手段。工程师们可以在虚拟环境中对设计方案进行功能验证,包括推力性能、燃油效率、热防护能力等关键指标的评估。通过反复迭代仿真与优化过程,能够迅速发现设计中的问题并进行调整,直至达到设计要求。

4.2 试验阶段的应用

在航空发动机的试验阶段,数字孪生技术同样发挥着重要作用。在物理试验之前,工程师们可以利用数字孪生技术搭建虚拟试验环境,这个环境能够模拟发动机在真实工况下的运行状态,包括温度、压力、振动等

参数的实时变化。通过虚拟试验,工程师们可以预先评估试验方案的可行性与安全性,减少试验过程中的不确定性与风险,虚拟试验还可以为物理试验提供数据支持与参考,提高试验的准确性与效率。在试验过程中,发动机可能会出现各种异常现象,传统的诊断方法往往依赖于经验判断与事后分析,难以做到实时预警与快速定位。而数字孪生技术则通过实时监测发动机的运行数据,结合机器学习算法进行风险预测与诊断。系统能够自动识别异常数据并发出预警信号,同时提供问题可能的原因与解决方案。在试验阶段,工程师们还会对发动机的性能进行持续优化,数字孪生技术通过构建性能优化模型,结合仿真分析与实验数据反馈,对发动机的设计参数与运行策略进行调整。通过反复迭代优化过程,系统能够找到最优的性能表现方案,提高发动机的推力、燃油效率与可靠性等关键指标。

4.3 制造加工阶段的应用

在航空发动机的制造加工阶段,数字孪生技术同样展现出了巨大的潜力与价值。在制造加工阶段,数字孪生技术通过构建生产过程的数字模型,实现了生产数据的实时采集、处理与分析。这些数据包括机床运行状态、刀具磨损情况、加工精度等关键指标。通过数字化管理手段,工程师们能够实时监控生产进度与质量状况,及时发现并解决问题,数字孪生技术还能够对生产数据进行深度挖掘与分析,为生产决策提供科学依据与数据支持^[4]。基于数字孪生技术的智能化制造系统能够自动调整加工参数、优化加工路径并预测加工结果,通过集成先进的传感器技术、人工智能算法与机器人技术,系统能够实现对加工过程的精准控制与优化。这种智能化制造方式不仅提高了加工精度与效率还降低了人力成

本与错误率。数字孪生技术还能够实现生产过程的可视化展示与远程监控,为生产管理人员提供了更加直观、便捷的管理手段。在制造加工阶段,质量追溯与改进是确保航空发动机质量的重要环节,数字孪生技术通过构建质量追溯系统实现了对生产数据的全面记录与追溯。当发现质量问题时系统能够迅速定位问题源头并追溯相关生产批次与工艺参数。同时基于数据分析与挖掘技术系统还能够发现潜在的质量问题与改进空间为质量改进提供科学依据与数据支持。

5 结束语

随着航空发动机制造技术的不断进步,数字孪生应用架构的探索与实践将持续深化。该架构不仅为航空发动机的研发与生产提供了强有力的技术支持,也为整个航空制造业的智能化转型树立了标杆。未来,期待更多创新技术的融合与应用,共同推动航空发动机制造迈向更高水平,为航空事业的蓬勃发展贡献力量。

参考文献

- [1]曹增义,单继东,王昭阳,等.面向航空发动机制造的数字孪生应用架构探索与实践[J].航空制术,2022,65(19):40-49. DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.040.
- [2]孙敏.“数字孪生”改变行业规则的顶尖技术[J].大飞机.2018,(6).44-47.
- [3]张玉良,张佳朋,王小丹,等.面向航天器在轨装配的数字孪生技术[J].导航与控制.2018,(3).DOI:10.3969/j.issn.1674-5558.2018.03.012.
- [4]王岭.基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体对接技术研究[J].计算机测量与控制.2018,(10). DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2018.10.061.