

基于数字孪生的航空发动机全生命周期管理

Aero Engine Life Cycle Management Based on Digital Twin

■ 刘婷 张建超 刘魁/中国航发研究院

数字孪生 (Digital Twin) 技术被认为是实现物理 - 虚拟世界高度融合的重要手段。什么是数字孪生? 它源自何处? 在航空发动机领域有何应用?

随着物理学、数据科学和新一代信息技术 (云计算、大数据、物联网、人工智能等) 的集成和扩展应用, 以智能制造为主导的下一代数字化制造技术正在酝酿。而如何实现物理 - 虚拟世界间的信息互通和高度融合是智能制造实现的基础。在这样的背景下, 数字孪生作为支撑未来物理 - 虚拟世界之间虚实交融的最有潜力的手段, 逐渐进入公众视野, 并被加德纳 (Gartner) 公司预测为2018年排名前十的战略技术趋势之一。

数字孪生的概念

数字孪生的概念是由美国密歇根大学的迈克尔·格里夫斯 (Michael Grieves) 教授与美国国家航空航天局 (NASA) 的专家约翰·维克斯 (John Vickers) 共同提出的, 并于2003年在格里夫斯教授所讲授的产品生命周期管理 (PLM) 课程上被首次引入。

受限于当时的信息技术条件和数据采集能力, 数字孪生在初期仅仅是一个颠覆性的概念, 以辅助理解物理实体与其背后蕴藏的信息之间的关系。在随后的十年内, 支撑



图1 数字孪生示意图

虚拟产品开发以及物理产品设计制造维修的信息技术获得爆炸式发展, 大量的虚拟开发工具涌现, 不仅能超现实地描述物理实体的几何细节, 还能通过仿真预测其性能。此外, 企业对产品健康管理的需求导致大量无损检测技术 (如传感器、坐标测量仪、视觉系统和白光扫描等) 出现, 使得越来越多的产品运行数据被采集。

上述技术的发展, 为探索数字孪生如何成为产品闭环全生命周期中的重要组成部分带来了新的契机。2011年, 美国空军研究实验室 (AFRL)

将数字孪生引入飞机机体结构寿命预测中, 并提出了一个机体的数字孪生体的概念模型 (如图1所示)。2012年, NASA发布《技术领域11:建模、仿真、信息技术和处理路线图》, 给出了数字孪生的具体定义, 并被广为接受。数字孪生是一个集成的多物理、多尺度、概率性的在建系统高保真仿真模型, 由数字主线 (digital thread) 驱动, 借助高精度模型、传感器信息和输入数据来映射和预测实际物理孪生实体全生命周期的运行情况 and 性能。

数字主线是一种可扩展、可配置和组件化的企业级分析框架, 可

以无缝加快权威技术数据、软件、信息和知识在企业信息-知识系统中的相互作用。数字主线基于数字系统模型(DSM)模板,在系统全生命周期的各个阶段通过提供访问能力、集成能力和将异构数据转换成可操作信息的能力,为决策者提供信息。由此可知,数字主线可为数字孪生提供数据接口和接入标准,具有集成和处理大量异构数据的能力,支撑物理世界与数字世界之间的双向数据交流。

通过分析数字孪生的定义可知,数字孪生的内涵包括以下几个方面:

- 数字孪生包含表征在建系统材料微观组织结构、缺陷、制造公差等特性的精确模型,且其长度跨越了从微米到米的宽广范围;

- 数字孪生需要一系列高保真物理模型的支撑;

- 数字孪生高度依赖综合健康管理系统(IVHM),不断传输产品运行过程中的实时监测数据,如变形、应力、应变、温度、振动等,动态修正自身模型,精确预测和监控产品的性能、寿命、任务可靠性,达到虚实融合的目的;

- 数字孪生通过大数据挖掘、文本挖掘集成产品数据资料、维修报告和其他历史信息,为仿真提供支撑。

数字孪生技术可在实际产品运行之前,先在虚拟的环境中进行“试运行”,研究不同任务参数或异常现象所带来的影响,验证性能退化和损伤的缓解策略,支持参数化研究以优化运行方案,使得任务成功的概率最大化;此外,数字孪生可以映射实际产品的运行过程,通过不断接收实际产品运行时的负载、温度等环境参数,修正模型精度,连续预测实际产品的运行情况;数字孪生的另一个重要应用是实时预判产品运行过程中可能发生的潜在事故,当实际产品上布置的传感器将产品健康退化的状态传递到数字孪生体中时,能迅速分析并诊断出导致异常现象的原因;此外,数字孪生可预测产品出现设计状态未考虑到的异常情况时的性能变化、任务成功率和产品剩余寿命,为产品管理者提供决策依据。

数字孪生的研究现状

AFRL将数字孪生技术应用于飞机

机体的结构寿命预测中,并提出一种数字孪生机体概念,它具有超写实性,包含实际飞机制造过程的公差和材料微观组织结构特性。借助高性能计算机,数字孪生机体能在实际飞机起飞前进行大量虚拟飞行,发现非预期失效模式以修正设计;通过在实际飞机上布置传感器,可实时采集飞机飞行过程中的参数(六自由度加速度、表面温度和压力等),并输入数字孪生机体中修正其模型,进而预测实际机体的剩余寿命(如图2所示)。目前,NASA的专家正在研究一种降阶模型(ROM),以预测机体所受的气动载荷和内应力。将ROM集成到结构寿命预测模型中,能够进行高保真应力历史预测、结构可靠性分析和结构寿命监测,以提升飞机机体的管理。上述技术突破后,就能形成初始(低保真度)的数字孪生机体。此外,美国空军科学研究办公室正在开展结构力学项目,旨在研究高精度结构损伤发展和累积模型,与此同时,AFRL的飞行器结构科学中心在研究热-动力-应力多学科耦合模型,这些技术成熟后

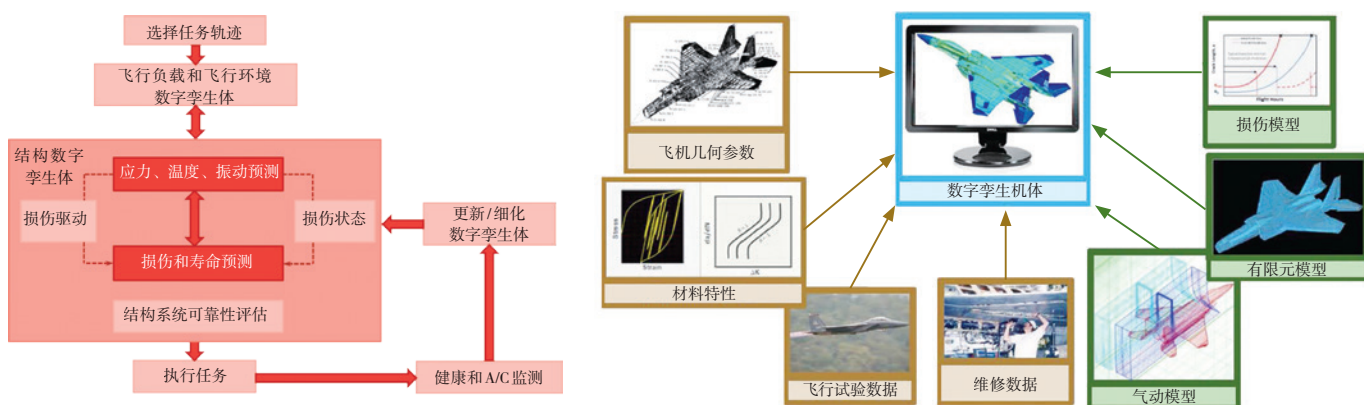


图2 数字孪生机体概念模型寿命预测功能示意图

将被逐步集成到数字孪生体中，以进一步提高数字孪生机体的保真度。

除此之外，世界各大企业、制造商和软件厂商也基于自身业务，提出与之对应的数字孪生应用模式，致力于实现虚拟与现实世界的深度交互和融合，推动企业向协同创新研制、生产和服务转型。

美国GE公司已将数字孪生应用于各种工业活动中，并取得显著成效。在电力领域，目前已建成先进的、功能强大的发电厂数字孪生体，它集成了发电厂内各部件的分析模型，同时在实际发电厂内布置了3000~5000个传感器，将测量的震动、温度和压力等参数实时上传到数字孪生体中，以预测设备的健康状态、磨损情况和性能。在航空领域，GE公司的多型正在使用的民用涡扇发动机和正在研发的先进涡桨发动机(ATP)采用了或拟采用数字孪生技术进行预测性维修服务，根据飞行过程中传感器收集到的大量飞行数据、环境和其他数据，通过仿真可完整透视实际飞行中的发动机实际运行情况，并判断磨损情况和预测合理的维修时间，实现故障前预测和监控。GE的数字孪生体在其开发的Predix工业云平台上运行。Predix平台是一个集成的平台及服务环境，可以获取由设备传感器传输的海量数据，同时管理和运行分析模型，以高速驱动商业规则引擎并管理大规模的工业数据。今后，Predix平台将与业务应用相结合，允许企业的决策者、管理者和工程师基于平台进行实时交互。

美国洛克希德-马丁公司生产的F-35“闪电”II通过数字孪生技术

大大提升了军用战斗机制造和装配的自动化程度。数字孪生使得来自工程设计的3D精确实体模型被直接用于数控(NC)编程、坐标测量仪(CMM)检测和工具(也是3D实体模型)制造。迄今为止，采用数字孪生技术已经实现了前所未有的部件装配首次成功率，减少了返工次数，同时由于供应商数据重新配置导致的工程变更时间也大大缩减。

法国达索公司提出了未来应用于航空业、矿业、城市规划等各种领域的数字孪生概念，即在其3D Experience平台上对复杂产品的特点和行为进行展现、建模、模拟和可视化，使得产品设计者和用户在产品诞生之前和制造过程中就能与产品进行互动，进行产品测试，发现并消除潜在风险，辅助用户理解产品工作情况。此外，在产品加工过程中，通过将实际测量的加工参数(如公差等)上传至3D Experience平台中，实现数字孪生体的动态修正，进一步提高其预测精度。基于达索公司在产品全生命周期管理中的优势，波音公司计划在航空航天与防务项目上，扩大与达索的合作。

德国西门子公司所提出的数字孪生概念在其产品生命周期的各个阶段有不同的表现形式，在产品的设计、制造和运行维修阶段分别表现为产品数字孪生体、生产工艺流程数字孪生体和设备数字孪生体，帮助企业在实际投入生产前既能在虚拟环境中优化、仿真和测试产品性能，在生产过程中同步优化整个企业制造工艺流程，最终实现高效的柔性生产和快速创新上市，锻造企业持久竞争力。此外，西门子公司建立了MindSpere工业云平台，作为

支撑数字孪生体运行的环境，物理设备基于西门子的技术和工具，使设备的运行数据被实时上传到云平台中，实现物理和虚拟世界的融合。

美国参数技术公司(PTC)建立了ThinkWorx工业物联网平台，可将各种工业设备连接起来，通过大数据和预测分析技术，进行产品的故障诊断，提高产品实际运行时间。但采用上述方法提高售后与支持服务的效率有限。因此，PTC引入AR/VR虚拟现实技术，计划将数字孪生与ThinkWorx工业物联网平台的预测性维修功能相结合，使维修人员可在虚拟现实的环境下与数字孪生交互，甚至为现场工作人员提供PTC的专家支持，从而提高维修效率。最终，通过将数字孪生信息反映到下一代产品的设计研发阶段，实现闭环的产品全生命周期数字化管理。

航空发动机数字孪生体的体系框架

传统的航空发动机研制模式已经无法满足日益增长的发动机性能和工作范围需求，以信息化为引擎的数字化、智能化研制模式是未来的发展趋势。虽然数字化的提出由来已久，但之前的概念并没有上升到数字孪生的高度。数字孪生发动机的构建，将引发发动机智能化制造和服务的颠覆性创新。

笔者建立了如图3所示的面向航空发动机闭环全生命周期的数字孪生体应用框架。需要说明的是，在全生命周期的不同阶段，数字孪生体有不同的表现形式。具体来说，在设计和试验阶段，理论上还没有物理的发动机存在，此时与航空发动机数字孪生体相对应的是用户的

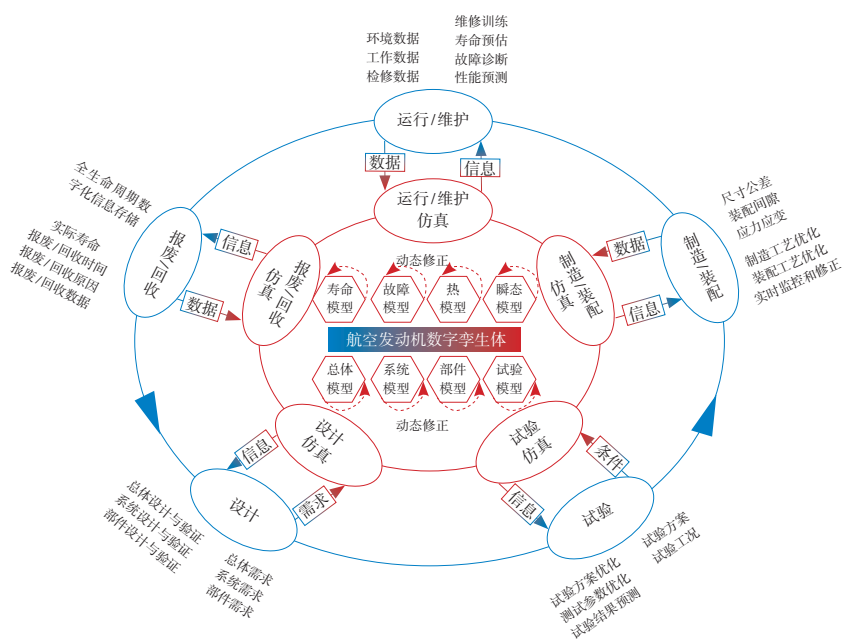


图3 航空发动机数字孪生体应用框架

需求，通过将量化的需求指标输入到数字孪生体中，修正其模型，可预测发动机设计的可靠性。而在制造/装配、运行/服务阶段，与航空发动机数字孪生体对应的是物理的发动机，通过将过程中物理发动机的测量参数实时传入数字孪生体中，实现虚实高度融合。在报废/回收阶段，虽然物理发动机不存在了，但数字孪生体作为其全生命周期的数据和信息的管理库，可以延伸到下一个周期的研制过程中，形成闭环的全生命周期管理。下面简述每个阶段的应用过程。

设计阶段

航空发动机的研制是一项典型的复杂系统工程，面临着研制需求复杂、系统组成复杂、产品技术复杂、制造过程复杂、试验维修复杂、项目管理复杂、工作环境复杂等问题，基于同类型航空发动机的数字孪生体，根据量化的用户需求指标（如

推重比、耗油率、喘振裕度、效率和可靠性等），可在设计阶段快速构建个性化新型发动机的完整仿真模型，形成新型发动机的数字孪生体，并对其整体性能和功能进行多系统联合仿真，大大提高新产品的设计可靠性，快速验证新产品的设计功能。

试验阶段

传统航空发动机的研制主要依靠物理试验，为了测试航空发动机实际工作性能和特性，需要建立能够模拟发动机实际工作环境和工况条件的试验台，如地面模拟试验台、高空模拟试验台、飞行模拟试验台等。一方面，试验方案、试验工况的设计和优化需要长期摸索，试验时间和成本高昂；另一方面，一些极端工况可能在现有试验条件下无法实现。基于设计阶段形成的航空发动机数字孪生体，可构建包含综合试验环境的航空发动机虚拟

试验系统，基于量化的综合试验环境参数，不断修正其模型，可对试验方案和测试参数进行优化，同时预测对应工况下发动机的性能，诊断其潜在的风险，强调在实际飞行之前进行“试飞”。

制造/装配阶段

在发动机制造和装配前，基于其数字孪生体可以进行制造和装配工艺优化；在制造和装配过程中，通过传感器实时采集制造和装配过程信息（尺寸公差、装配间隙、应力应变等），基于大数据技术驱动航空发动机数字孪生体持续更新，实现虚实高度近似，在物联网技术的支撑下，可实现对发动机零部件制造过程的实时监控、修正和控制，保证零件的加工质量同时形成个性化的发动机数字孪生体，为后续运行/维修阶段服务。

运行/维修阶段

在实际发动机出厂时，存在一个与其高度一致的发动机数字孪生体同时交付给用户。在发动机运行/维修阶段，基于IVHM实时监测航空发动机的运行参数和环境参数，如气动、热、循环周期载荷、振动、应力应变、环境温度、环境压力、湿度、空气组分等，数字孪生体通过对上述飞行数据、历史维修报告和其他历史信息进行数据挖掘和文本挖掘，不断修正自身仿真模型，可实时预测发动机的性能，进行故障诊断和报警，借助VR/AR等虚拟现实技术，还可实现支持专家和维修人员沉浸式交互，进行维修方案制订和虚拟维修训练。

报废/回收阶段

在实际物理发动机被回收或报废之后，与其对应的数字孪生体作

为发动机全生命周期内数字化信息的存储和管理库，可被永久保存，并被用于同类型发动机的研制过程中，构建闭环的发动机全生命周期数字化设计 and 应用模式，形成良性循环，大大加速发动机的研制流程，提高发动机设计的可靠性。

数字孪生的关键技术

建立航空发动机数字孪生体，需要克服许多关键技术难题。

一是多尺度、多物理场耦合模型的建立。航空发动机属于高温高压高速旋转的热力机械，其中包含大量热、气动、结构、强度等多学科耦合现象，且不同的物理场往往具有不同的时间和几何尺度，因此实现对于航空发动机内实际物理现象的精确求解十分困难，尤其是瞬态问题的求解。目前许多研究人员都在致力于上述研究，提出了一系列方法，典型的有界面接口法，即按学科划分求解域，每一个时间步长下，不同求解域单独求解，并通过统一的界面接口交换数据，该方法的关键和难点在于维持耦合以及确保求解的稳定性、精度和收敛性。此外，还有联合界面边界条件法（CIBC），广义有限元法（GFEM），空间-时间法和降阶模型（ROMs）等。

二是传感器测量。航空发动机数字孪生体仿真的可靠性高度依赖于从实际运行发动机上采集的数据。目前航空发动机使用过程中监测的状态参数很少（典型参数包括：压力、流量、转速、温度、热流密度等），测量位置十分有限，需要引入更多在线监测技术，能够高频率采集发动机内关键部位的状态参数，如应力分布、变形、气流速度、高温蠕变、

裂纹生成等。此外，发动机的实际使用过程是在高空环境中，如何将大量数据实时传输到地面、过滤噪声数据并处理大量异构数据也是亟需解决的难题。

三是不确定性的量化、模拟和控制。控制仿真不确定性量级的因素主要为计算的尺度和保真度，但影响不确定性的因素有很多，比如仿真的各项输入参数，且这些输入参数所带入的不确定性的量级可能会超过模型中其余的不确定性，此时通过不断细化计算尺度和提高保真度，对结果不确定性的积极影响可能不抵由于计算成本增加所产生的消极影响，需要在二者间选择一个折中方案。因此，在执行仿真前需要判断所选择的尺度和保真度对于仿真结果不确定性的影响，以控制不确定性的量级，现有的方法大都为抽样法，如蒙特卡罗（Monte Carlo）法等，会产生高昂的计算成本，需要研究更为高效的不确定性量化方法。

四是大规模数据库处理。数字孪生体本身是一个庞大的数据库，难以进行输入、完整性维持和数据处理。航空发动机数字孪生体的几何完整性和模型离散化需要建立并维持于数字孪生体的使用期内，同时离散化的模型还需要根据发动机的损伤和修复情况自动进行调整。此外，发动机在设计、试验或实际运行过程中所产生的数据是海量的，这些数据必须具备快速、精准可追溯性，并使用友好的方式将预测信息呈现给用户，以支撑设计者/决策者做出判断。据悉，以现有的10MB/s的速度对一个1PB的数据库中1%的数据进行可视化时，需要35个工作日，无法满足数字孪生

的使用需求。

五是高性能计算能力。研究表明，一个飞机的数字孪生体具有1012个自由度，如果其中还包含一些多尺度的材料微观模型，那么这些模型对应位置将有107个自由度。因此实现基于仿真的设计和验证需要高性能计算能力。航空发动机具有比飞机更为复杂的结构和特性，航空发动机数字孪生体需要比现在更加高速的计算性能，使得仿真过程能与物理发动机的实际运行过程同步进行，换言之，如果数字孪生体的仿真不能在物理实体的实际运行结束之前完成，那么数字孪生在寿命预测和决策指导方面的作用将得不到体现。

结束语

数字孪生技术是未来降低航空发动机研发周期和成本，实现智能化制造和服务的必然选择。航空发动机数字孪生体通过接收发动机全生命周期各个阶段的数据，动态调整自身模型，实时保持与实际发动机高度一致，预测、监控发动机的运行情况和寿命。此外，数字孪生体可作为航空发动机生命期内数据的管理库，应用到同类型产品的下一个研发周期中，可大大提高研发速度，降低研发成本。随着关键技术的不断攻克，未来航空发动机数字孪生体会作为实现数字化设计、制造和服务保障的重要手段，使得发动机创新设计、制造和可靠性上升到全新的高度。

航空动力

（刘婷，中国航发研究院，工程师，从事航空发动机仿真工作。）