

数字孪生在航空发动机领域的应用分析

Application of Digital Twin in Aero Engine

■ 王乐 周军 崔艳林 / 中国航发涡轮院

随着大数据、物联网、智能发动机等概念的提出和兴起，一种能够实现物理世界与虚拟信息世界交互与融合的技术手段——数字孪生（Digital Twin）应运而生，为解决航空发动机研制中日益突出的多系统、多维度协调任务与不断提高的设计效率、验证准确性、辅助决策的高效性之间的矛盾提供了新的思路。

数字孪生技术是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。数字孪生不是简单的仿真模拟、不是单纯的数据存储平台、不是一成不变的系统，而是面向包括产品设计、试验、加工制造、运行维护的全生命周期，可以根据产品的行为和变化而不断演化的数字映射系统（如图1所示）。2013年，美国空军发布《全球地平线》顶层科技规划，将数字孪生称为“改变游戏规则”的颠覆性机遇；2016年和2017年，信息技术研究与顾问咨询公司高德纳（Gartner）将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一；2017年11月，美国武器生产商洛克希德-马丁公司将数字孪生列为未来航空航天与国防的6大顶尖技术之首。近年来，基于数字孪生技术的创造性和颠覆性，数字孪生技术已经逐渐从理论研究快速向工程应用转变，该项技术在航空发动机全生命周期的各个阶段也有所应用。

数字孪生技术用于设计

基于数字孪生的航空发动机设计

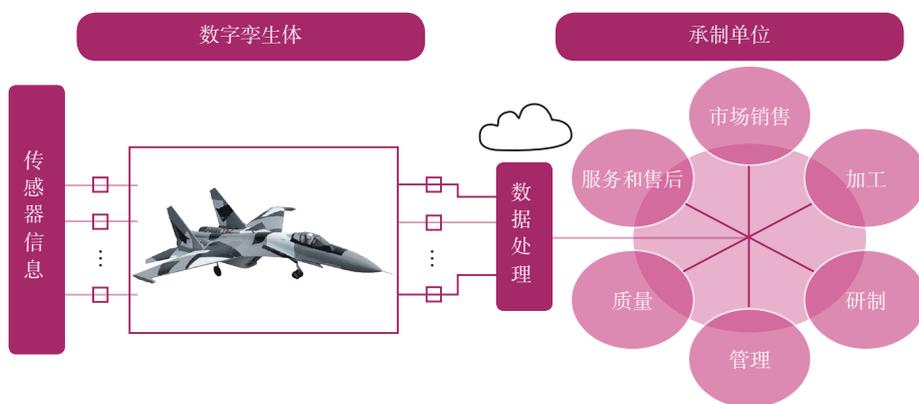


图1 数字孪生在产品全生命周期内的应用示意

设计的意义

基于数字孪生的产品设计是指在产品数字孪生数据的驱动下，利用已有物理产品与虚拟产品在设计中的协同作用，不断挖掘产生新颖、独特、具有价值的产品概念，将其转化为详细的产品设计方案，以降低产品实际行为与设计期望行为间的不一致性。在航空发动机设计阶段，数字孪生的主要作用在于：根据用户要求，构建发动机仿真模型，形成发动机数字孪生体，并对其性能和功能进行多系统联合仿真，快速验证产品的设计功能。

数字孪生技术在航空发动机设计领域的典型应用案例

2018年2月，罗罗公司提出了

“智能发动机”（Intelligence Engine）愿景，希望借助数字孪生等数字化技术，建立航空动力的互联性，使发动机具有情境感知和理解能力。此后，在“智能发动机”愿景的推动下，罗罗公司为发动机的每个叶片都创建了数字孪生体，并于2019年成功测试了“超扇”（UltraFan）发动机设计方案。

GE航空集团将数字孪生技术视为加速未来先进技术发展的一个重要推动力，并专门开发了数字孪生工业云平台Predix，目前正在该平台上开展先进涡桨发动机（Advanced Turboprop, ATP）的研制工作，用作公务机和通用飞机的动力。

俄罗斯联合航空制造集团公司(UEC)下属的礼炮制造中心从2019年年底开始将数字孪生技术应用于产品设计,其目的在于打造统一的数字平台(如图2所示),整合所有产品和数学模拟过程中产生的数据、文件 and 专业化软件程序,该中心使用了多种数值模拟方法,每种方法都对应特定的发动机设计阶段,目前技术人员正准备将该数字平台集成至数值模拟方法中,后续该技术将运用到雅克-130飞机改进设计以及发动机的部件调试和验证试验中。

数字孪生技术用于试验 基于数字孪生的航空发动机试验的意义

数字孪生驱动的测试/检测模式是指在虚拟空间中构建高保真的测试系统及被测对象虚拟模型,借助测试数据实时传输、测试指令传输执行技术,在历史数据和实时数据的驱动下,实现物理被测对象和虚拟被测对象的多学科、多尺度、多物理属性的高逼真度仿真与交互,

从而直观、全面地反映出产品全生命周期的状态,有效支撑基于数据和知识的科学决策。数字孪生技术不仅可以用于建立精确的航空发动机数学模型,还可以用于开展大量的虚拟试验和适航性验证试验,包括开展加温、冷却及气动载荷作用下的模拟试验、模拟叶片断裂的特种试验、吞鸟试验、结构可靠性和耐久性试验等。在航空发动机试验中,数字孪生的主要作用在于:设计阶段通过一系列可重复、可变参数、可加速的虚拟试验,提前验证航空发动机不同工况和外部条件下的性能情况。在发动机试验过程中,通过从传感器上传的数据实时反映发动机实体的整个行为过程,通过试验过程中获取的数据查找故障原因,预测可能发生的故障及模型优化和修正。

数字孪生技术在发动机试验领域的典型应用案例

俄罗斯航空发动机行业计划在2024年完成数字孪生技术引入工作,计划通过开展模拟真实条件下虚拟试验、开发高保真验证模型、采用

专门的计算结果分析方法来提高测试质量,减少试验项目。预计该项技术将用于TV7-117ST、AI-222-25涡扇发动机和其他民用航空发动机中。目前,数字孪生技术在俄罗斯航空发动机领域已得到了实际应用。联合发动机公司(UEC)下属土星科研生产联合体在进行发动机台架试验时,会同时建立其数字孪生体。通过该数字孪生体,工程人员可以实时了解到发动机的整个工作过程,有效查找和排除台架试验阶段发现的问题,建立起实物与数字孪生体的互联互通。

数字孪生技术用于制造加工 基于数字孪生的航空发动机制造加工的意义

数字孪生起源于工业制造,主要的应用对象也是工业制造。在航空发动机制造加工中,数字孪生的主要作用体现在设备层、产线层和工厂层的数字虚拟化。在设备层,通过在研制初期建立的数字孪生体,进行航空发动机制造设备、制造流程、电气设备、软件同步设计,通

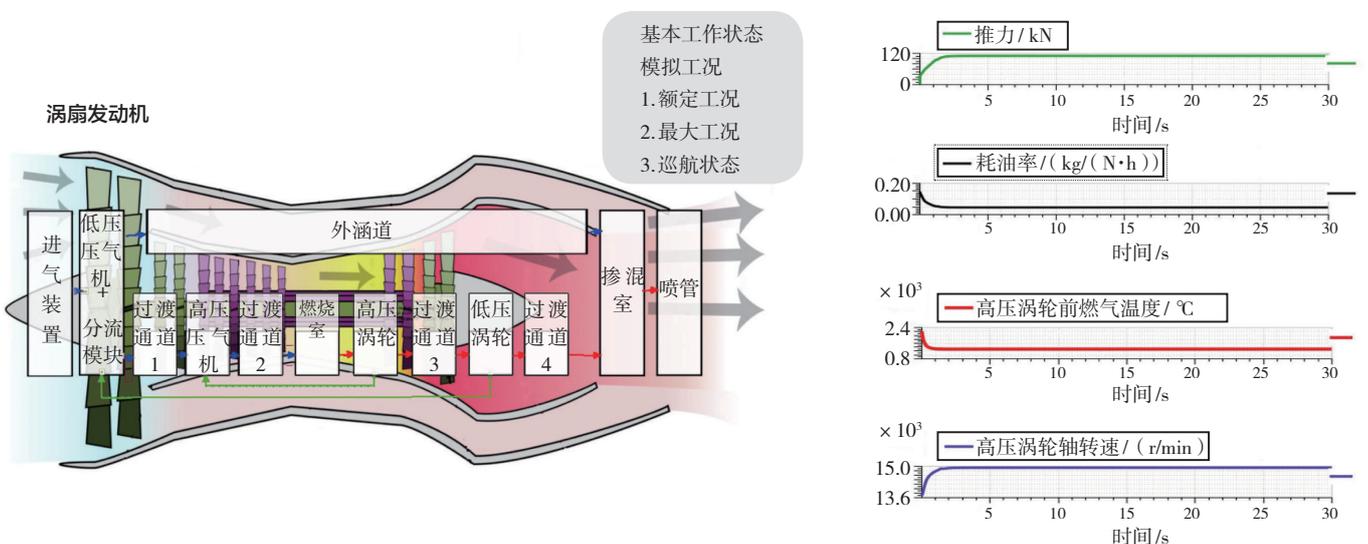


图2 礼炮制造中心开发的数字孪生工作平台

过数字孪生体验证制造过程，在验证过程中出现问题时，只需修正模型，修正完成后再次执行仿真，直至正确完成整个加工过程。在产线层，通过建立物理生产线的数字孪生体，提前进行安装、测试工艺仿真，模拟航空发动机制造的整个工艺流程。在工厂层，借助数字孪生体，建立数字化生产链和生产车间，实现计划、质量、物料、人员和设备的数字化管理。

数字孪生技术在航空发动机加工制造领域的典型应用案例

洛克希德-马丁公司利用数字孪生技术创建“数字主线”(Digital Thread)的工作模式，改进了多个工作流程。通过流程改进，公司处理F-35进气道加工缺陷的决策时间缩短了33%，此项创举获得了2016年美国国防技术制造金奖。

2018年7月，土星科研生产联合体建立了采用数字孪生技术的生产车间，来开展燃气涡轮发动机及其组件制造生产链的数字化工作，并应用物联网技术，将数据感应、采集与生产控制系统及车间数字孪生关联在一起，以实现实物和孪生体的互联共生。

2019年年底，俄罗斯圣彼得堡理工大学完成了TV7-117ST-01涡桨发动机数字孪生技术开发项目第一阶段工作。该项目的目的是减轻航空发动机的质量，根据数字和智慧工厂的运营原则开发新的生产流程。使用数字孪生技术后，未来预计可使该型发动机质量减轻50%。

2019年德国弗劳恩霍夫研究所与爱立信公司合作开展了数字孪生在整体叶盘制造过程中的应用探索，应用数字孪生结合5G、人工智能等

新技术，提出了整体叶盘高性能加工的技术解决方案，实现了整体叶盘生产过程的自动监测和实时控制。

数字孪生技术用于运营维护 基于数字孪生的航空发动机运营维护的意义

在航空发动机运营维护阶段，数字孪生的主要作用在于：实时监测航空发动机的运行状态，根据发动机的使用情况、运行维护记录，进行健康诊断和分析，提前发现产品潜在质量问题，进行预警，自动触发自愈机制或提出解决方案来降低损害，同时将运行信息反馈给设计部门，以优化设计、改善产品性能。

数字孪生在航空发动机运营维护领域的典型应用案例

GE航空集团已经将数字孪生技术成功应用到了航空发动机的运营维护领域。GE航空集团认为，从概念设计阶段就建立数字孪生体，这样更有利于建立发动机设计、结构模型与运行数据的关联。GE航空集团通过汇总设计、制造、运行各阶段积累的数据及发动机实体在各阶段的情况，实现对发动机运行过程进行精准监测、故障诊断、性能预测和控制优化，其中就包括建立了波音777飞机的GE90发动机叶片数字孪生体，实时监测叶片的工作状态，特别是在中东等容易造成零件材料腐蚀剥落的沙漠地区。

基于数字孪生技术在航空发动机的实际应用，GE航空集团还开发了预测性维修和维护产品——TrueChoice，帮助客户优化全生命周期内的成本。罗罗公司则在智能发动机愿景的框架下建立了全套数学模型，并将发动机实体工作时的场景映

射到数字孪生体来改进和调整发动机的运行状态和发动机高效维护。

数字孪生技术对我国航空发动机研制的作用

目前，我国航空发动机的数字化应用水平还比较低，体系化程度不足。在组织模式方面，我国采取厂所分离的形式，串行研制模式还未得以改善；在全生命周期管理方面，协作和管理平台的应用才刚起步；在研制方法方面，仍广泛采用传统的设计、试验、加工和维护方法，数字化程度较低。面对新一代航空发动机的研制需求，我们迫切需要采用先进的数字化技术来提高研制能力，缩短与国际先进水平的差距。

统一数据存储和管理平台，解决数据孤岛和数据利用问题

目前，国内航空发动机的设计、试验、加工制造和健康管理还未建成统一的管理平台，各自为营，不成体系。试验数据由试验人员统一管理和处理，设计人员无法直接访问或获取原始试验数据，不利于从原始数据方面入手排查。试验数据在处理或传递过程可能会因存储不当或人为因素造成篡改或缺失，不利于保证设计分析的正确性。试验人员在试验准备时，也无法查看设计文件，无法详细了解设计方案和目的，不利于试验人员设计和优化试验方案，从而有针对性地进行数据处理。此外，工艺和维修人员无法访问设计和试验平台存储的数据，无法更全面地了解航空发动机的整体情况，只能基于传统的工艺流程和经验开展相关工作。

数字孪生是以数字主线为基础，贯穿于产品设计、试验、生产制造

和健康管理的全生命周期流程。产品研发的各阶段均在统一的工作平台内完成，生成的所有孪生数据、孪生模型和孪生过程均存储在统一平台内。在整个平台内，参与航空发动机研制的所有人员都可以在系统内访问所有历史数据，包括最近更新的数据。访问权限取决于设定的用户角色，以保证工作的透明性、加强管控、保证后续使用数据完好无损。并且，整个发动机全生命周期过程均以数据模型的形式存储在网络空间中，可以有效实现数据的可溯源、可复现。系统还可以自动生成发动机当前计算结果与设定要求匹配度报告，加快产品研制过程和内部数据交互速度。

加快设计-验证迭代，解决试验耗时长和试验条件限制问题

对于传统的航空发动机研发，需要开展大量的试验进行可靠性、安全性和特性验证，耗时较长。完成验证后，还需要根据试验结果反复迭代、多次修正，产品调试时间长，花费成本高。对试验设备的要求也很高，需要建立专门的地面台、高空台、飞行台。而且，试验具有局限性，无法模拟一些极端工况。

采用数字孪生技术可以实现航空发动机虚拟试验模拟。开展虚拟试验不需要建立任何的实体试验设备，还可以缩减大量地面和飞行试验数量。只需将设计阶段建立的数字孪生体放置在虚拟试验场，设置真实的试验环境开展试验，就可以验证发动机的各项性能，指导发动机实体的试验与测试安排。此外，进行虚拟试验时，试验发动机上的传感器安装位置已经精确设定，所需开展的试验工况也已确定。在开

展样机试验时，技术人员无须再花费大量的时间来确定传感器的分布位置，考虑最佳试验循环数。试验完成后，采用数字孪生技术可以实现数据自动计算和分析，降低了人为因素引起数据缺失或篡改的可能性，缩短了人工手动处理数据的时间。数字孪生技术还可以用于模拟非机载状态，帮助技术人员快速了解发动机一些参数、外部条件、附件故障时发动机的工作情况。根据俄罗斯礼炮制造中心和英国安本（Aberdeen）集团预测，采用数字孪生技术后，可以缩短15%~20%的研制周期，节约27%的研发成本。

多学科设计，解决传统模拟仿真方法精度不高和仿真限制问题

我国各科研院所和企业在进行航空发动机研制的过程中广泛采用CAD、CAE、UG等模拟仿真软件，尽管这些软件的功能已经非常强大，但具有不确定性和非线性等问题，产生的海量数据需要耗费大量的人力、物力成本进行处理，还需要根据获取的数据不断地手动迭代来修正模型。此外，传统的航空发动机仿真建模是以独立的单元体为基础，各单元体之间没有关联和交叉，耦合性不强。

数字孪生系统是一个带自学功能的高精度系统。它不仅可以通过模型驱动和数据驱动不断优化用于解决传统机理模型无法解决的一些问题，还能从静态结构组成和动态过程两方面确保研制精度。静态方面来讲，数字孪生技术是集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真系统，由许多相互关联的物理和数学模型组成，每个模型均可以描述发动机的热力学、强度、声学、气动性能。模拟的过程中考虑了材

料、几何形状、电子线路、控制系统等因素的影响，可以在考虑控制系统智能算法工作，有效结合虚拟试验、全机样机试验、子系统样机试验与设计要求的匹配情况下开展复杂过程深度分析。动态方面来讲，数字孪生体是对航空发动机实体整个动态过程的真实反应，双方互联互通。航空发动机实体通过传感器将数据映射至数字孪生体。数字孪生体在不断接收实体数据的过程中演化。接收到的数据不仅可以用于反映实体的使用行为，验证计算模型，如零部件内部载荷、幅频特性、总振动量、噪声、压力脉动、温度和疲劳损伤等，还可以用于不断修正和优化模型、改进设计和加工，避免开展大量的样机试验。实体发动机与数字孪生体间的误差不超过5%。根据数字孪生技术研制航空发动机有可能一次就通过验证试验和国家试验。

结束语

数字孪生技术作为各先进航空发动机企业大力发展的一种技术，可以提高整个研制过程的有效性、经济性和安全性，从而达到缩短产品的研制周期、降低研制成本的目的。针对我国当前广泛采用的传统模拟仿真技术的缺点和研制、生产、维护多方断口式工作模式造成发动机研制周期长、费用高的特点，数字孪生技术以其在数据使用和管理、模拟仿真的高精度、解决问题能力强等方面的优势，将成为我国航空发动机产业赶超国际先进发展水平的重要手段和强有力的助推剂。

航空动力

（王乐，中国航发涡轮院，工程师，主要从事航空发动机科技情报工作）