

数字孪生在航空发动机制造工艺中的应用探索

The Application of Digital Twin in Manufacturing Process of Aero Engine

■ 朱宇 李海宁 曹志涛 阚鑫禹 魏钱铤 / 中国航发研究院

数字孪生技术不仅可利用人类已有理论和知识建立虚拟模型，而且可利用虚拟模型的仿真技术，探讨和预测未知世界，以发现和寻找更好的方法和途径、不断激发人类的创新思维、不断追求优化进步。因此，数字孪生技术为当前航空发动机制造业的创新和发展提供了新的理念和工具。

近年来，在大力推进智能制造的进程中，数字孪生的概念和技术逐渐得到研究与运用，成为世界范围内的研究热点，获得了广泛和高度的关注。在生产制造领域，研究人员将更多的注意力集中在生产车间系统设计、生产调度、资源管控、物流配送、可视化监控等方面，开展了数字孪生理论研究和技术应用（如图1所示）。数字孪生在生产制造领域的应用探索主要集中在智能车间、生产线设计与管控等方向，但在落地应用过程中缺乏相应的理论和技术支撑，特别是如何将数字孪生技术与具体制造工艺过程相结合，开展数字孪生与制造工艺过程的融合应用探索，充分发挥数字孪生在实现物理对象与虚拟模型实时双向映射中的巨大优势，实现高效、低成本、高质量制造。

经过几十年的努力，我国航空发动机制造技术和制造装备取得了重大进展，但在制造技术发展过程中存在较多技术瓶颈和短板问题，特别是在航空发动机数字化与智能制造的应用和推进过程中，面临制造技术、配套装备基础能力薄弱，信息技术融合不足等问题，制约了

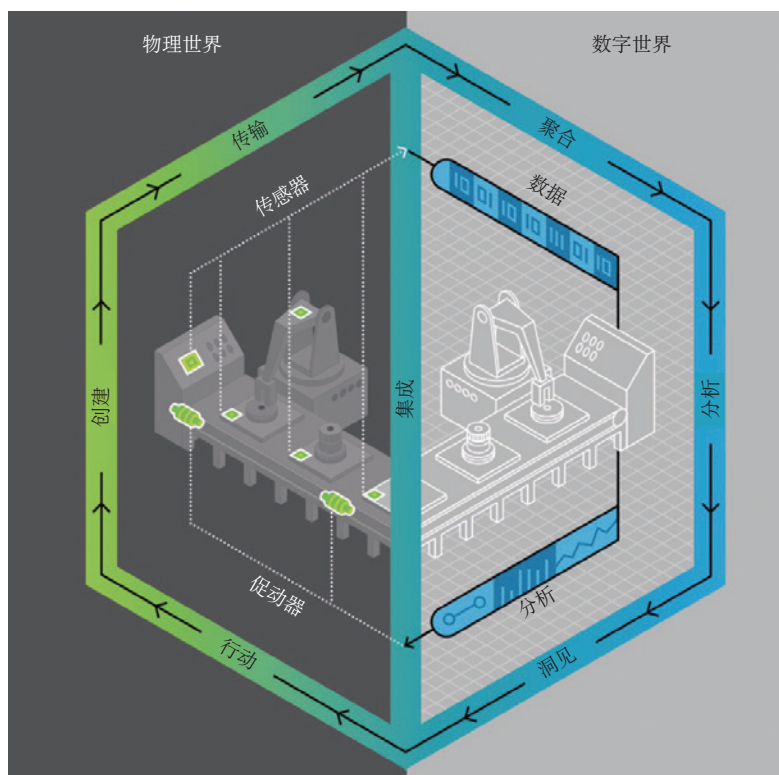


图1 数字孪生虚实融合示意图

发动机的研制和发展。推动航空发动机先进制造技术与新一代信息技术融合应用，提升航空发动机数字化、智能化制造整体水平，有利于突破我国航空发动机制造技术体系面临的瓶颈，显著提高制造技术成熟度、增强核心能力，是实现航空

发动机高质量发展的重要支撑，也是推动航空发动机制造业转型升级和跨越发展的关键环节。

制造工艺数字孪生应用模型框架

为使数字孪生进一步在具体制造工

艺研究中实现落地应用,参考数字孪生五维模型的通用模型^[1],本文提出了一个结合具体制造工艺过程的数字孪生应用模型(如图2所示)。

制造工艺过程(物理实体)

制造工艺过程是数字孪生模型的构成基础,主要包括制造工艺过程涉及的设备、原材料、辅助工装夹具等子系统以及部署的传感器。各个子系统实现不同功能,共同支持物理实体即整个制造工艺过程的监测、控制与优化过程。

制造过程模型(虚拟实体)

制造过程模型包括制造工艺过程涉及的几何模型、物理模型、行为模型、规则模型等,是在功能与结构上的集成,这些模型从多时间尺度、多空间尺度对制造工艺过程进行描述,形成与制造工艺过程物理实体对应的完整映射^[1-2]。几何模型为描述形状、尺寸、位置等几何参数与关系的三维模型。物理模型在几何模型的基础上增加了物理属性、约束及特征等信息,通常可用Ansys、Abaqus等软件工具从宏观及微观尺度进行动态的数学近似模拟与描述,如结构、流体、电场、磁场建模仿真分析等。行为模型描述了物理实体受外部环境干扰,以及内部运行机制共同作用下产生的实时响应及行为,行为模型的创建涉及问题模型、评估模型、决策模型等多种模型的构建,可利用马尔可夫链、神经网络等建模方法创建。规则模型包括基于历史关联数据的规律、基于隐性知识总结的经验,以及相关领域标准与准则等,这些规则随着时间的推移自增长、自学习、自演化,具备实时的判断、评估、优化及预测的能力,不仅能对物理

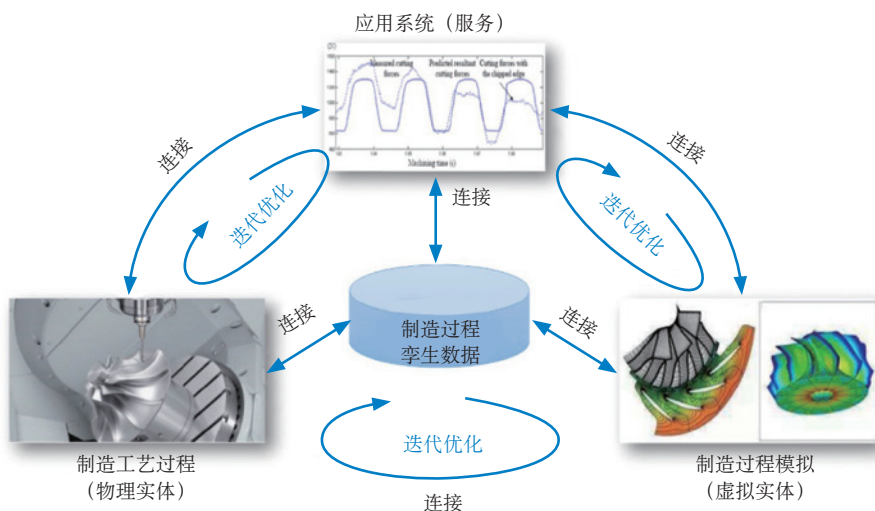


图2 制造工艺过程的数字孪生应用模型

实体进行控制与运行指导,还能对虚拟实体进行校正与一致性分析,可通过集成已有的知识获得,也可利用机器学习算法不断挖掘产生。

应用系统(服务)

对数字孪生应用过程中所需各类数据、模型、算法、仿真、结果进行封装,以工具组件、中间件、模块引擎等形式支撑数字孪生内部功能运行与实现,并以应用系统(或平台)等形式满足不同用户的不同业务需求,包括物理实体全生命周期各个阶段的优化,以及虚拟模型的测试、校正,使其忠实映射物理实体。

制造过程孪生数据

制造过程孪生数据受制造工艺过程、制造过程模型、应用系统运行的驱动,主要包括制造工艺过程数据、制造过程模型数据、应用系统数据、知识数据及融合衍生数据等^[1-2]。制造工艺过程数据主要包括体现制造过程规格、功能、性能、关系等的物理要素属性数据,与反映制造过程运行状况、实时性能、环境参数、突发扰动等的动态过程

数据,可通过传感器、嵌入式系统、数据采集卡等进行采集;制造过程模型数据,主要包括几何模型、物理模型、行为模型、规则模型相关数据以及基于上述模型开展的过程仿真、行为仿真、过程验证、评估、分析、预测等的仿真数据;应用系统数据主要包括算法、模型、数据处理方法等相关数据;知识数据主要包括专家知识、行业标准、规则约束、推理推论、常用算法库与模型库等;融合衍生数据则是对上述几种类型数据进行处理后得到的衍生数据和信息物理融合数据,从而反映更加全面与准确的信息,并实现信息的共享与增值^[1]。

连接

通过连接实现数字孪生各组成部分的互联互通,使制造工艺过程、制造过程模型、应用系统在运行中保持交互,一致与同步;连接使制造工艺过程、制造过程模型、应用系统产生的数据实时存入孪生数据,并使孪生数据能驱动三者的运行。以制造工艺过程与孪生数据之间的连接为例,可利用各种传感器、嵌

入式系统、数据采集卡等对制造工艺过程数据进行实时采集，通过控制过程的“对象链接和嵌入-统一架构”(OPC-UA)等协议规范传输至孪生数据，经过处理后的数据或指令也可通过OPC-UA等协议规范传输反馈给制造工艺过程并实现其运行优化。

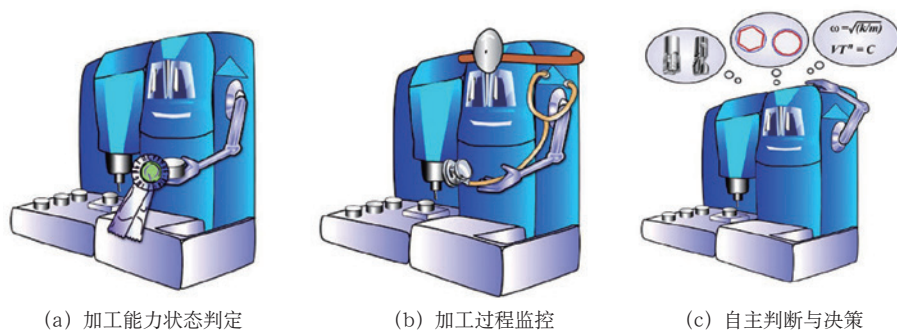


图3 智能加工示意图

基于数字孪生的复杂构件智能加工应用

在制造工艺数字孪生应用模型框架的基础上，结合航空发动机零部件制造的特点，本文对基于数字孪生的复杂构件的智能加工的基本概念和关键技术加以阐释。

航空发动机整体叶盘、机匣等复杂构件的数控加工是一个高度非线性、难以准确预测的过程，加工过程并非一直处于理想状态，而是伴随着材料的去除出现多种复杂的物理现象，如热变形、弹性变形以及系统振动等，导致加工过程中依据零件理论模型编程得到的“正确”程序，并不一定能够加工出合格、优质的产品。正是由于上述各种复杂的物理现象，加工后的构件表面完整性差，导致加工及热处理后的显著变形以及服役过程中的应力集中，甚至降低航空发动机的服役性能和寿命，并威胁飞行安全。产生上述问题的原因在于，常规数控加工经常只考虑数控机床或者加工过程本身，缺乏对加工过程实时数据的采集处理，对工况及时的感知和预测以及对加工过程的有效监控和加工参数的实时调整优化。

基于数字孪生的智能加工技术结合现代传感、5G通信等新一代信息技术，通过标准数据接口实现加工

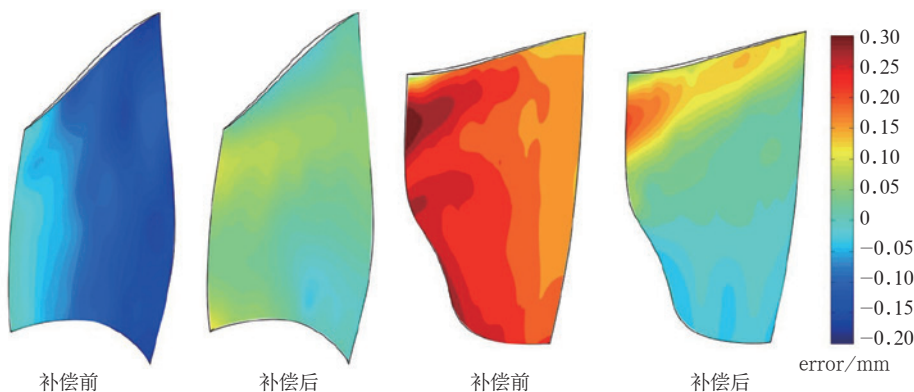


图4 叶片叶盆面与叶背面开展智能加工前后误差分布对比

过程实时数据转换与传输，通过在线监测数据建立数字孪生模型并实现加工过程的数字化与实时虚拟可视化，通过在机检测技术实现加工品质的在机快速评定，进行智能加工控制系统与加工设备的动态集成，实现制造过程物理世界和信息世界的深度融合与集成应用，实现每个试件的高性能制造(如图3所示)。

相对于传统的数控加工，智能加工技术以数字孪生为核心、以加工过程大数据及其挖掘方法为支撑，采用无扰嵌入式多源感知和图形处理器(GPU)高性能技术相结合的方法建立关键构件加工过程的数字孪生模型，形成人工经验知识的数字化集成途径，有望带动关键构件加工领域人类知识与机器知识的高

度融合以及机器知识的爆发式增长，从而实现复杂关键构件制造品质的跨越式提升。图4显示了叶片叶盆面与叶背面开展智能加工前后误差分布对比情况。

实现数字孪生驱动的智能加工技术，构建复杂构件制造过程的虚实融合系统，亟待突破以下技术问题。

一是智能加工技术体系构建。以复杂构件的高性能制造为牵引，研究实时物理空间与数字孪生虚拟空间的全要素融合理论，建立基于数字孪生的涵盖仿真、物联、数据、控制等要素的智能加工技术体系架构。

二是现场多源数据无扰感知与处理。加工过程是一个高度非线性、难以准确预测的过程，基于智能传感、5G等新技术，建立加工过程的多源

无扰感知方法,进行低延时闭环控制,实现复杂构件加工状态、设备状况等信息的在线感知。

三是数字孪生工艺模型构建。建立加工过程的数字孪生模型,研究数字孪生行为仿真、可靠验证、运行状态可视化分析等,形成人-机知识融合及机器知识的积累机制。

四是数据驱动的加工过程调控与自主进化。通过对现场加工数据的采集、分析、判断,建立加工过程状态数据与加工品质之间的映射关系,实现加工过程的调控和自主优化,并建立数据驱动的加工过程自主诊断与自主进化机制,实现加工过程机器知识的积累。

整体叶盘制造过程的具体应用

新型航空发动机整体叶盘设计中的薄壁和高扭曲叶片需要极其稳定的铣削工艺和高度复杂的工艺设计与规划,以避免在铣削过程中叶片振动而产生不可接受的表面缺陷,这使切削加工成为整体叶盘制造中关键的工艺流程之一。由于切削加工过程变化瞬息万变,实时高质量监测难度极大,这意味着在切削完成之前无法预测最终结果。目前整体叶盘的铣削过程可以持续一整天甚至能够达到100h或更长时间,并且返工率通常可高达25%以上,工时成本大。而且,未来的整体叶盘设计仍在不断向轻量化和更复杂的结构方向发展,甚至很快将超出目前制造工艺和设备的能力范围。因此,通过建立整体叶盘的数字孪生模型,实时监控并及时发现加工过程中的异常振动等问题,将监测数据用于即时优化铣削过程,实现加工过程

的调控和自主优化,有利于提升产品质量、提高加工效率、减少返工次数、显著降低加工成本,对实现整体叶盘的高性能制造具有重要的意义。

德国的弗劳恩霍夫研究所在2019年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^[3-6],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化监控和实时控制。

现场多源数据收集和处理

整体叶盘切削加工过程处于高度非线性状态,存在热变形、弹性变形、残余应力以及系统振动等多种复杂的物理现象,获得现场多源数据、实现高质量监测的难度很大。5G技术的主要优势是可以提供非常低、稳定和可预测的延迟,并通过提供这种低延迟功能来实现控制闭环,满足实时控制需要在1ms内完

成处理传感器信息的要求。通过微型传感器和5G通信模块可以实现无线数据采集和数据传输,以及更严格控制的监控功能。将使用5G的传感器放置在试件或工具上,实现当前故障的实时检测,并将错误率降低至15%。为了监控铣削过程,试件配备了一个无线智能传感器,可以检测当前的过程稳定状态,该智能传感器使用直接连接到试件表面的微型加速度传感器捕获整个铣削过程的试件振动(如图5所示)。传感器系统将频率范围高达10kHz的振动信号传输到机器外部的接收器系统,以进行后续数据分析和确定过程稳定性。

数字孪生模型构建

传统工艺设计基于试错法,低效、耗时并依赖于人的经验,使得该阶段的成本和时间不可预测。为了解决上述问题,基于从智能传感器和机器控制系统收集的实时数据,针对整体叶盘加工过程和物理设备从多时空



图5 试件局部放置智能传感器

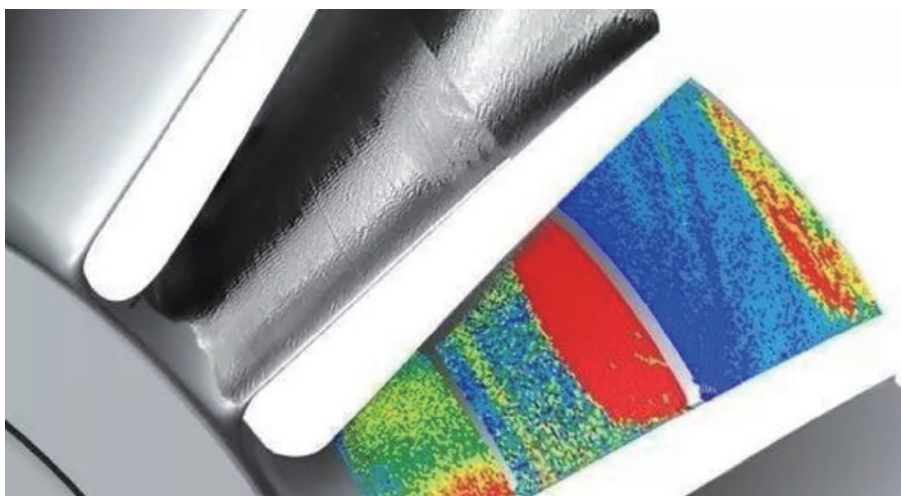


图6 整体叶盘加工过程的数字孪生模型

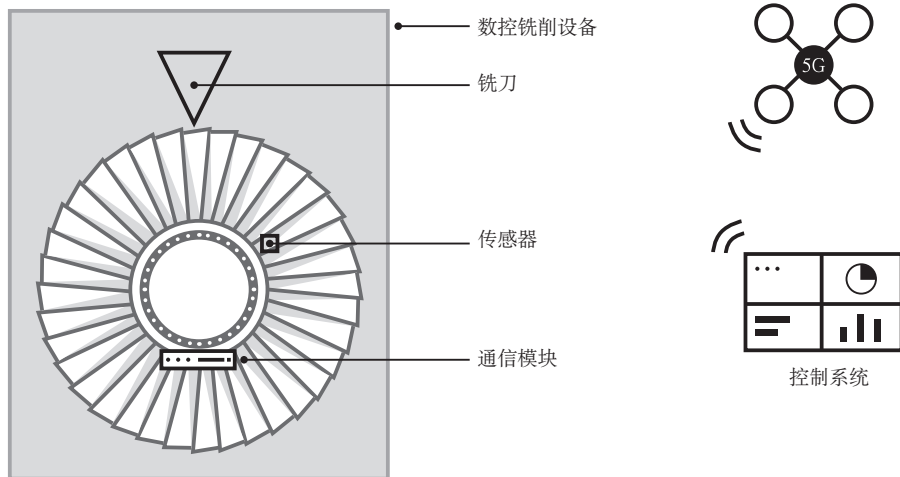


图7 自适应控制过程

尺度建立模型，实施多物理场和多尺度的模拟仿真分析，形成人-机知识融合具备实时的判断、评估、优化及预测能力，从而形成整体叶盘制造过程的数字孪生模型，实现虚实双向连接与交互等（如图6所示）。

加工过程调控与自主进化

开展实时监控，防止缺陷零件为进一步加工，并定位和描述缺陷以及启动返工；进一步对加工过程实时控制，调整优化加工工艺，例如改变铣刀旋转速度等，实施自适应

柔性加工。

以叶片振动状态的自诊断、自决策、自进化过程为例（如图7所示）。从控制系统连续提取刀头坐标数据、传感器数据并与工件表面上的工作位置相互关联，结合叶片的模拟数据，确定精确的控制策略；以传感器数据、机床控制的刀具位置和模拟数据作为输入，计算基于实际工况及其动态变化的最佳主轴速度，并将此信息反馈给控制系统最终形成闭环，有效避免过大振动（甚至是共振）发生导致加

工中断和试件报废。

结束语

数字孪生为实现物理世界与信息世界的交互与共融提供了清晰的思路、方法和实施途径，为当前制造业的创新和发展提供了新的理念和工具。航空发动机作为体现国家综合实力的战略性新兴产业，实现高质量和可持续发展成为未来目标。推动数字孪生技术与航空发动机制造过程的应用融合，为新一代航空发动机关键构件加工过程的仿真、优化与高性能制造奠定基础，对提升航空发动机数字化、智能化制造整体水平，增强核心技术能力具有重要的意义。

航空动力

（朱宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机先进制造技术与智能制造研究）

参考文献：

- [1] 陶飞，刘蔚然，张萌，等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统，2019，25（1）：1-18.
- [2] 陶飞，刘蔚然，刘检华，等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统，2018，24（1）：1-18.
- [3] Kottasová I. How 5G will transform manufacturing[OL]. CNN Business, 2019-05-05.
- [4] Becker P. 5G networked aerospace production[OL]. Fraunhofer Institute for Production Technology IPT, Aachen. aeromag.com, 2019-07-21.
- [5] A case study on real-time control in manufacturing[Z]. An Ericsson Consumer & Industry Lab Insight Report, 2018.
- [6] Dilba D. Blisk development: How blade and disk became one[OL]. aereport.de, 2019-05-03.