

数字孪生助力航空发动机跨越发展

Digital Twin Boosting Leap-Forward Development of Aero Engine

■ 刘永泉 黎旭 任文成 隋岩峰 / 中国航发动动力所

随着航空发动机性能指标和系统复杂度的显著提升，仿真日益成为支撑航空发动机全生命周期研发的重要手段。数字孪生技术是建模与仿真技术的高度升华，必将进一步助推航空发动机的跨越发展。

航空发动机是在高温、高压、高转速和交变负荷等恶劣条件下长期重复使用的热力机械，研制难度大、周期长、投资多、风险高，航空发动机的研制可以说是在挑战工程科技的极限。为满足飞机日益提升的作战能力需求，航空发动机研制也面临着跨越发展的挑战。发动机任务需求和技术指标不断提高，需要利用变循环、自适应、多电等新构型来实现，也造成了系统复杂度的显著提高。发动机内部多学科深度耦合，各部件之间、主机与控制/润滑等系统之间的交联耦合也是越来越复杂；同时，复杂运行环境下系统动态特性快速多变，产品研发难度显著增大；此外，由于研制进度的紧迫，迫切需要大量采用数字仿真替代物理试验，加速迭代优化，降低技术风险^[1]。

航空发动机数字孪生的技术内涵

“孪生”（twins）概念最早可追溯到美国国家航空航天局（NASA）的阿波罗项目^[2]，属于“实体孪生”。2003年，密歇根大学格里夫斯（Grievess）教授提出了“数字复制品”的概念^[3]，以此奠定了数字孪生的基本雏形。2011年之后，数字孪生迎来了新的发展契机，美国空军

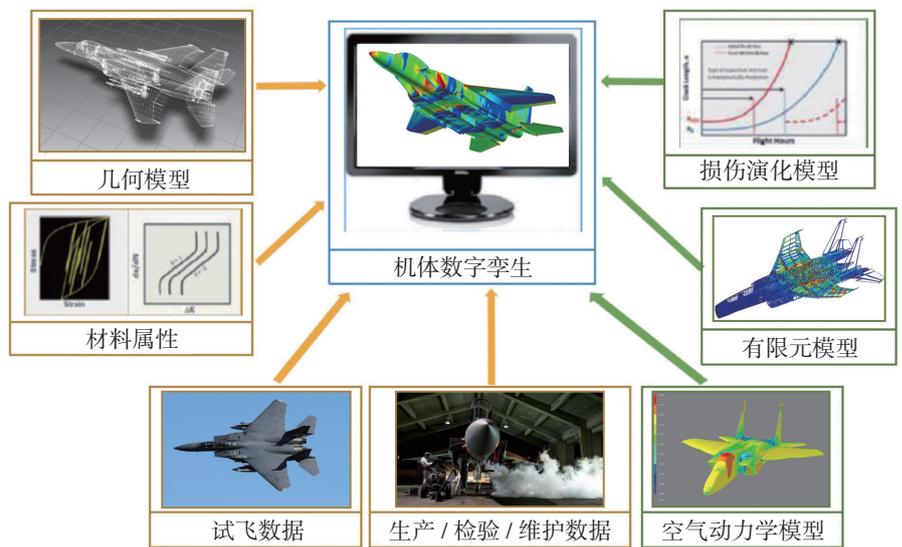


图1 机体数字孪生

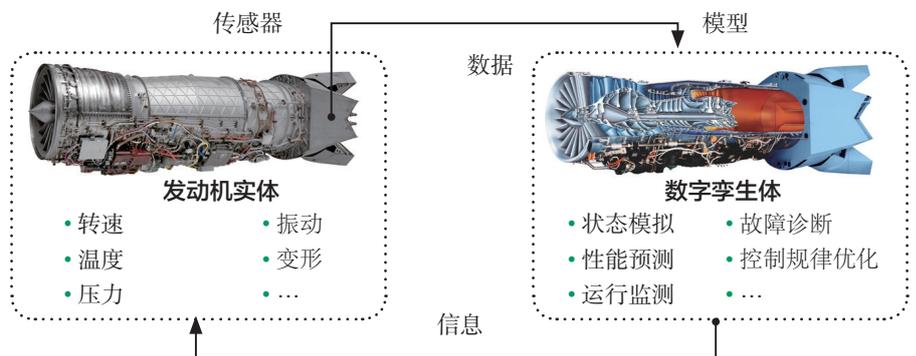


图2 航空发动机数字孪生概念

研究实验室（AFRL）提出机体数字孪生^[4-5]的概念，如图1所示。近年来，理论和应用研究推动数字孪生的概念层出不穷，但所关注的核心

均是模型和数据。因此，可以将航空发动机的数字孪生定义为：以数字化方式创建面向发动机的不同视角虚拟模型，通过虚实间的动态交

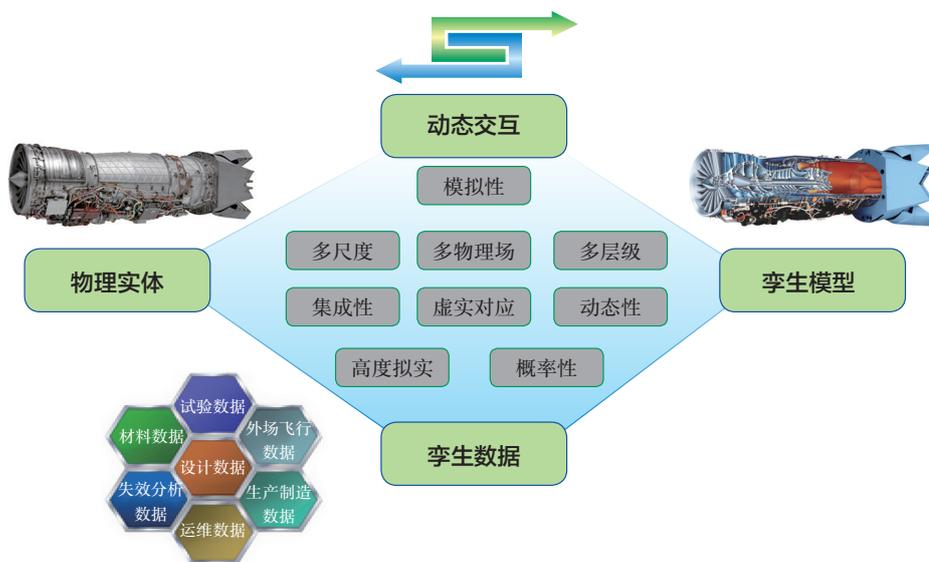


图3 航空发动机数字孪生的关键要素

互、数据融合分析等手段，模拟发动机在现实环境中的功能、性能和演变趋势的技术，其概念示意如图2所示。

航空发动机的数字孪生主要包括4个关键要素：物理实体、孪生模型、孪生数据和动态交互。数字孪生同时还具有虚拟、多尺度、多物理场、多层次、动态等诸多特性，如图3所示。具体来说，物理实体是数字孪生的应用载体，包括航空发动机及其部件、子系统以及相关设备、设施等，通过传感器采集其特征数据，实时地监测其环境数据和运行状态。孪生模型是数字孪生的核心要素，模拟航空发动机的性能、应力、变形、疲劳等特性对外界因素的响应，使用概率分析量化风险，使模型具备评估、预测等功能。孪生数据是数字孪生的应用基础，包括物理实体、孪生模型和外部环境产生的各种数据，通过不断更新与优化，支撑数字孪生的运行。动态交互是数字孪生的传输动脉，实现信息与数据实时交互，以保证实体

与模型之间的一致性与迭代优化。

航空发动机数字孪生应用需求

在航空发动机全生命周期的不同阶段，数字孪生解决的问题侧重点不同。针对航空发动机的研制特点，在设计、生产制造、试验和使用维护等不同的业务域，分析发动机实体特征并以孪生模型进行描述，构建连接实现虚实信息数据的动态交互，并借助孪生数据的融合与分析，

实现基于孪生的诊断、预测、控制和优化。

基于数字孪生的设计

基于数字孪生的产品设计是指在数据的基础上，利用已有物理产品和孪生模型在设计中的协同作用，不断挖掘产生新颖独特的产品概念并开展需求验证，转化成详细的产品设计方案，满足用户需要。

在基于数字孪生的设计过程中，集成了包含各种反映真实世界的数字模型，各种模型之间既相互独立又相互耦合。根据需要，数字孪生模型可以按照不同视角重新组合成各种虚拟样机，来表征和反映物理实体状态的变化。

在工程应用中，根据需求在对已有发动机模型重用的基础上，利用历史数据，形成初步的航空发动机数字孪生体，支持多方案筛选；伴随发动机方案确定，产生能够反映发动机功能、性能、结构、可靠性等各方面特性的数字孪生体，如图4所示。

在模拟环境下，对发动机的气动性能、结构强度等开展评估，诊断可能发生的故障及其产生机理，

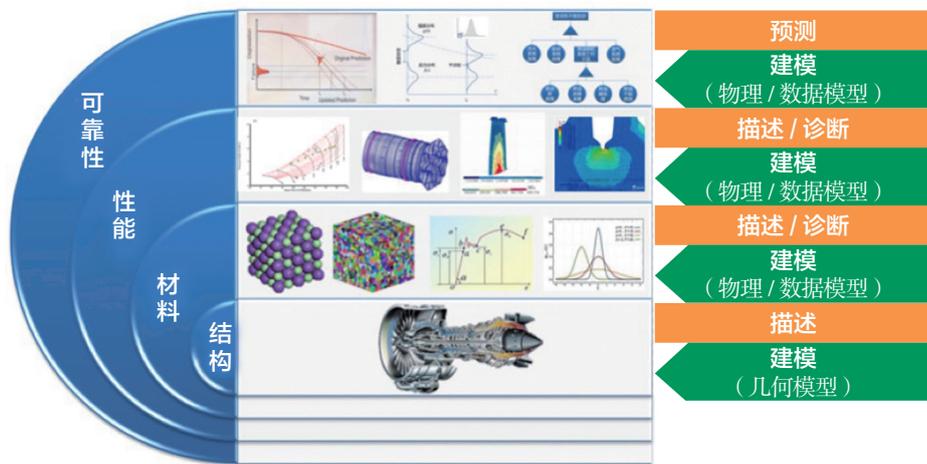


图4 基于数字孪生的设计示意^[6]

为设计优化迭代提供依据。

基于数字孪生的生产制造

基于数字孪生的生产制造，是结合现代传感器、5G通信等新一代信息技术，通过标准数据接口实现加工过程实时数据交换与传输。通过在线数据监测，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。通过在线监测技术实现加工品质的快速评定，进行智能加工控制与加工设备的动态集成。利用制造过程物理世界和信息世界的深度融合与集成，可以实现每个试件的高性能制造。

在零组件制造过程中，自动采集数据（包括图像、工艺和修理数据等）并精准映射到数字孪生体，开展自动分析，识别不合格品并验证影响因素，支撑工艺或设计更改，缩短处理时间，提升制造质量。

根据制造、装配过程中生成的数字孪生体的完整情况，实时监测生产线运行状况，及时调整生产工艺、优化工作流程和生产参数，提高生产效率。

基于数字孪生的试验

试验阶段的物理模型包含试验对象（整机、零部件）和试验环境，其数字孪生模型则是虚拟的试验对象与环境，在设计/制造数字孪生的基础上扩充试验设备、试验环境的模拟，以及基于海量历史数据构建的分析模型等。

在进入实际试验之前，利用试验阶段的数字孪生模型，一方面可以进行试验方案的评估与优化，缩短试验台的建设周期，降低建设经费；另一方面，可以进行大量的虚拟地面试验和高空台试验，预测发动机的功能、性能表现，预测可能

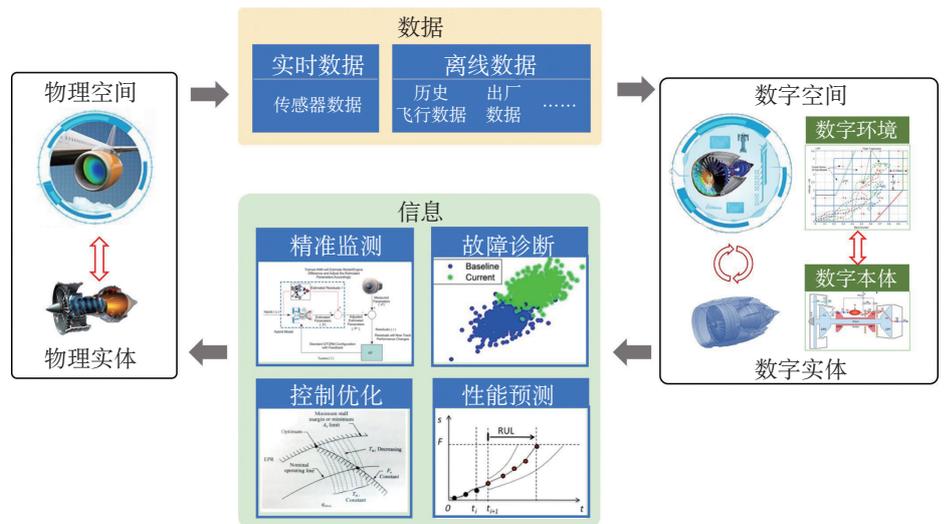


图5 数字孪生在运行维护中的应用^[7]

出现的故障，评估发动机的可靠性，如平均故障间隔时间、平均维修间隔时间、可靠度等，为设计和制造工艺的优化提供有价值的信息。

在实际试验过程中，通过将采集的试验数据（温度、压力、应力、振动等）和外部数据（环境温度、湿度、压力等）进行分析，通过与数字孪生的预测结果比较，修正发动机模型、环境模型和设备模型，不断提高数字孪生的预测精度，实现基于数字孪生的高精度预测。

基于数字孪生的使用维护

在运行维护阶段，利用数字孪生技术可以对发动机的运行环境和发动机建模，形成数字运行环境和数字运行本体，全面监测和评估发动机性能，结合运行环境信息优化发动机控制，实现早期故障预警和性能退化预测。

数字孪生在发动机运行维护过程中的场景如图5所示，主要解决发动机运行维护中的气路故障诊断、整机性能预测、控制优化等问题。每一台发动机交付时，都将有一个虚拟的数字孪生模型同时交付，并

在相应的虚拟空间运行。通过在虚拟空间建立相应环境模型和发动机模型，构成多维度、跨时间、高精度的可以表征物理空间实体行为的数字孪生模型，使得用户能够持续跟踪发动机的运行情况。通过收集实时和离线数据，反馈并修正模型，实现对发动机运行状态的高保真模拟、故障的精准预测和可靠性的实时评估。

航空发动机数字孪生技术架构

数字孪生强调利用物理空间与虚拟空间的交互和准确的模型描述真实物理世界。航空发动机的数字孪生是面向特定对象的应用型综合技术，利用高精度的仿真模拟实际发动机的状态，参考相关研究，对航空发动机数字孪生技术架构进行设想，如图6所示。

航空发动机的数字孪生包含两个空间，即物理空间和虚拟空间。在物理空间，真实发动机实际运行过程中，通过测量状态参数，关注其性能变化情况、功能实现情况以



图6 航空发动机数字孪生技术架构

及结构强度相关的特性，如振动、变形、寿命等；在虚拟空间，以建模对真实发动机进行描述，通过仿真算法开展仿真分析，并以可视化等手段反馈相关结果以支持决策。两者之间存在密切的动态交互，保证虚实之间高度的一致性。

为实现数字孪生，需要数据、模型和平台等必要的支撑条件。其中，模型是核心，包括准确描述实物状态的几何模型、数学模型、流动换热模型、故障诊断模型等，用于对发动机开展描述和模拟分析；需要采集充足的数据用于及时修正模型，为发动机的准确描述和高保真模拟奠定基础；同时，面向数字孪生的集成平台保证各项预测和分析能够高效完成，准确呈现。

利用航空发动机数字孪生，可以实现4项递进的基本功能，即对真实发动机进行准确描述、诊断发动机故障、预测发动机性能表现和辅助开展运行决策。

数字孪生还具备5大技术特点：一是利用模型对真实发动机进行准确映射，构成数字孪生模型；二是在数据的驱动下，实现描述、诊断、

预测等基本功能；三是在此过程中，实时的动态交互保证了虚实的一致性；四是通过智能决策指导开展对真实发动机的动态控制和自适应优化；五是亟待建立数字孪生平台，集成多物理场仿真、数据管理、大数据分析等多个功能模块，通过信息化手段对数字孪生进行有力支撑。

航空发动机数字孪生关键技术

根据航空发动机数字孪生技术架构，在开展数字孪生研究和应用过程中，应重点开展孪生模型构建、数据管理与分析、智能测试与传输、智能分析与决策、数字孪生集成平台等5项关键技术研究。

孪生模型构建技术

数字孪生模型是由传统模型发展而来，建立高精度的复杂系统模型是首要前提。目前，建模依然面临着环境、载荷、材料性能等众多不确定因素，流动、力学、传热、电磁等不同物理场之间的强耦合作用等各类问题，系统的复杂度将导致多物理场耦合建模的难度明显提升，并将进一步影响分析精度，

需要通过仿真校核、验证及确认（VV&A）等手段开展模型的逐层级验证，利用充分的数据开展模型修正，提升仿真的精度和置信度。

在高精度几何模型的基础上，借助复杂系统建模技术，如多物理场建模、多系统仿真等，建立发动机及关键子系统的性能演化模型，同时基于大数据分析技术提取降阶或代理模型，用于在线分析；结合存储的历史数据、专家经验确定可能故障，通过故障注入的方式，分析已知故障下系统的行为数据，构建故障模式库，作为诊断模块的故障识别基础。

由于航空发动机数字孪生模型本身的复杂性，应从多个视角对孪生模型进行分解，如图7所示，构建性能、系统和结构虚拟样机，描述航空发动机数字孪生体的性能、功能、结构等方面的特性，有针对性地开展整机以及推进系统仿真技术研究，并构建逐步向航空发动机数字孪生演进的思路。通过模型的有机集成，能够反映发动机各种特征，包括功能、性能、结构完整性、环境适应性、可靠性、维修性、保障性和安全性等。

数据管理与分析技术

航空发动机的数字孪生模型不是一个静态模型，而是一组过程模型和动态模型，需要随着数据的产生而不断演化。其数据由产品开发数据和基础数据构成，主要包括产品设计数据、产品工艺数据、产品制造数据、产品服务数据以及产品退役和报废数据等。通过构建航空发动机工程数据库，获取支撑数字孪生构建的全生命期各阶段的产品开发数据和基础数据，实现数据的

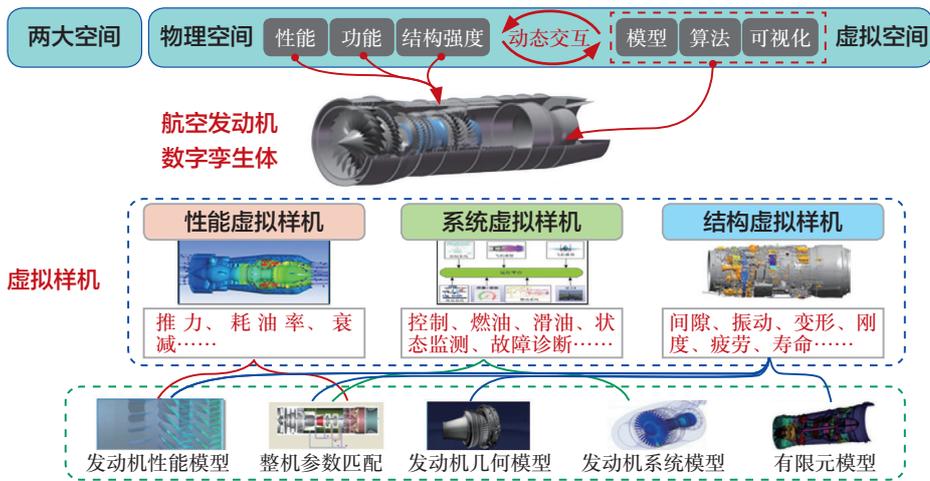


图7 孪生模型构建示意图

管理和有效利用。

对于航空发动机这种复杂系统，其基本几何和组件装配本身就已经囊括了海量的数据，而服役过程中不断加入的载荷、环境、维修等数据，最终将生成现有数据分析技术无法处理的大数据，这就需要借助大数据分析技术，从这些规模巨大、种类繁多、生成迅速、不断变化的数据集中挖掘价值。

从数据出发增强对问题的认识，发掘多源异构数据之间潜藏的相关关系，通过大数据的采集、存储、流通、集成和融合，利用多源异构数据诊断、预测并指导决策；利用“人工智能+大数据+云计算”，实现海量数据综合分析处理，支撑多场景的数字孪生建模与分析，从而更好地诊断、预测并指导决策。

智能测试与传输技术

以数字孪生体来模拟真实发动机在使用条件下的状态，需要实时的信息交互和更新，因此强大的数据获取能力不可或缺。

借助物联网等先进技术，通过传感与监测技术实时感知系统性能状态并收集系统周围的环境信息；

通过安装在系统结构表面或嵌入结构内部的分布式传感器网络，获取结构状态与载荷变化、操作以及服役环境等信息；实时监测系统的生产、制造、服役以及维护过程。持续获取的传感数据不仅能够用于监测系统当前状态，还能借助大数据、动态数据驱动分析与决策等技术用于预测系统未来状态。

为满足上述需求，需要发展传感器与构件一体化、智能传感器、视觉传感器等应用技术，实现对航空发动机全生命周期数据的高精度、高效率测量；发展基于物联网的全面感知、数据融合技术，探索测试设备、物联网与虚拟测试系统的融合方法，取得更高的测试精度。

智能分析与决策技术

智能分析和决策，主要是利用实测数据动态更新模型，更准确地分析与预测系统状态，量化不确定输入（载荷、边界、材料参数等）对性能、可靠性的影响，指导决策者实施对系统的动态控制；应用机器学习、数据挖掘等人工智能方法，描述、预测、引导并实现真实发动机的自适应优化。

数字孪生集成平台技术

数字孪生的实现需要发展新的工具平台，集成多物理场仿真、数据管理、大数据分析、动态数据驱动决策等多个功能模块，同时借助虚拟现实（VR）或增强现实（AR）等可视化技术，使决策者能够快速准确地了解系统实际状态，从而指导对系统的操作，实现效能更高的控制与优化。

通过在平台集成多物理场仿真、动态演化分析、诊断等多个功能模块，实现对数字孪生构建和应用的全过程支撑。利用模型的虚实动态交互，预演不同任务参数下的飞行场景，结合大数据分析中的智能算法，预测发动机的性能表现，动态优化发动机的控制规律。

航空发动机数字孪生发展展望

结合当前航空发动机数字孪生技术的应用需求和发展现状，后续可以“离线”孪生、“在线”孪生和“自主”孪生的三步走为目标，逐步开展研究和演进，实现航空发动机数字孪生的构建，如图8所示。

第一步，“数据+模型”为特征的“离线”孪生。建立畅通的生产制造数据、外场数据获取机制；开展多源异构数据的辨识、清洗、封装等方法研究；开展设计/制造/试验/运维大数据分析，利用基准数据修正模型，提升模型精度和置信度；性能、系统和结构3个虚拟样机各自演进，具备基于运行数据开展发动机性能预测、故障诊断的能力。

第二步，“动态数据驱动模型”为特征的“在线”孪生。基于智能传感器、嵌入式传感器的动态数据

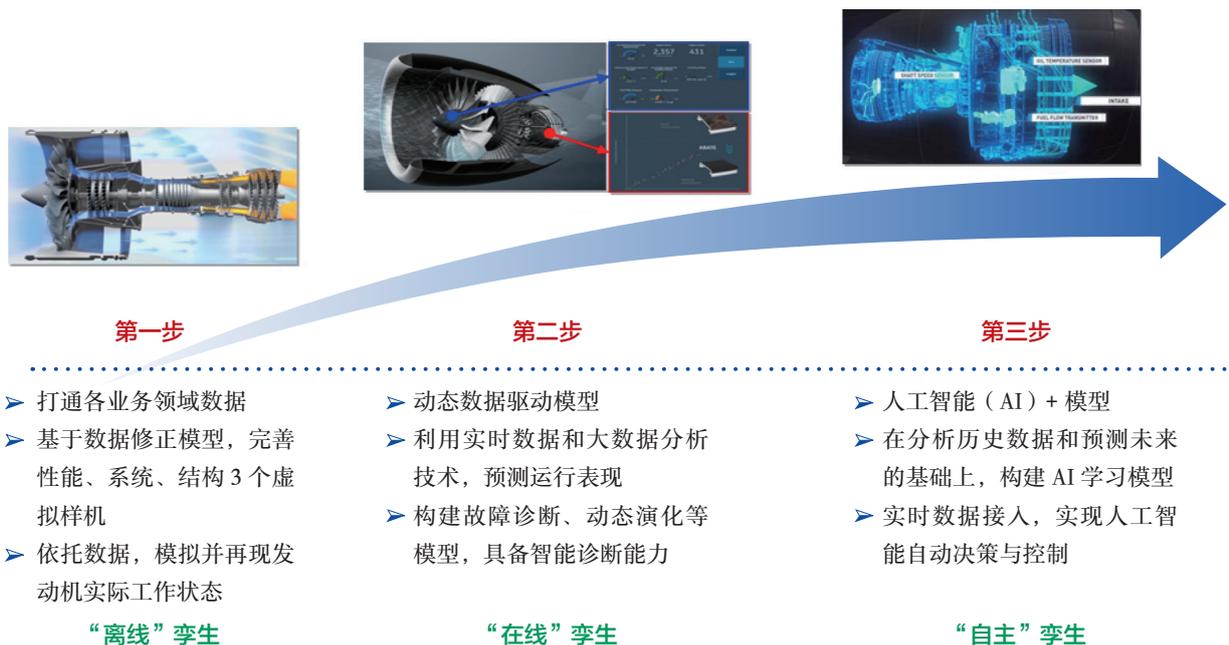


图8 航空发动机数字孪生未来展望

采集与传输；基于实时数据挖掘与分析的模型动态更新开展3个虚拟样机的深度融合，在耦合条件下模拟发动机的实时运行状态；基于演化模型和动态分析，实时预测发动机故障与损伤，制订维护策略。

第三步，“AI+模型”为特征的“自主”孪生。智能传感与物联网融合的数据采集和处理系统；海量实时非结构化数据分布式存储和数据挖掘；构建功能完备的发动机数字孪生体，利用人工智能实现孪生模型的实时优化；发动机智能实体的运行优化与自动决策。

结束语

在航空发动机的全生命周期中，数字孪生将建立连接虚拟世界与发动机实物世界的紧密联系，带来研发范式的变革。通过构建航空发动机数字孪生模型，基于真实数据对模型进行修正，在大数据和人工智能等技术的支持下，应用各类分析预

测模型，增加对此类复杂系统的认知，实现对航空发动机精准、全面、动态的仿真，从而加速设计验证进程，及时对运行状态和趋势进行预测，更高效地开展决策和优化。当前，数字孪生已成为业界研究热点，并且在部分应用场景中取得了一定的应用成效，但总体而言，数字孪生的研究和应用还处于起步阶段。可以预见，随着信息化、智能化水平的不断发展，数字孪生建模、数据管理与分析、智能传感与监测、智能分析与决策和数字孪生集成平台等关键技术将逐步成熟，数字孪生将为航空发动机的跨越发展提供持续动力。

航空动力

（刘永泉，中国航发集团专职型号总师、中国航发动力所总设计师、研究员，主要从事航空发动机研究）

参考文献：

[1] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018,

39(5): 961-970.

[2] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768

[3] 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.

[4] Rosen R, Von Wichert G, Lo G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing [J]. IFAC-Paper online, 2015, 48(3): 567-572.

[5] Grieves M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises [J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2):71.

[6] 刘魁, 刘婷, 魏杰, 等. 数字孪生在航空发动机可靠性领域的应用探索[J]. 航空动力, 2019(4): 70-74.

[7] 刘魁, 王潘, 刘婷, 等. 数字孪生在航空发动机运行维护中的应用[J]. 航空动力, 2019(4): 61-64.