

# 数字孪生在航空发动机运行维护中的应用

## The Application of Digital Twin in Aero Engine Operation and Maintenance

■ 刘魁 王潘 刘婷 / 中国航发研究院

随着多领域建模综合技术、新型信息技术的发展，数字孪生技术成为复杂装备系统运行维护领域的研究热点。航空发动机是典型的复杂装备系统，通过融合模型驱动和数据驱动的方法，构建航空发动机运维数字孪生体，可实现对物理发动机的精准监测、故障预测、性能和控制优化，为数字孪生技术在航空发动机全生命周期的应用提供参考。

### 数字孪生技术的发展

数字孪生通过建立物理空间和数字空间之间的精准映射和反馈机制，可实现物理空间和数字空间数据/信息的实时交换，并在复杂系统演进过程中，捕捉物理空间环境和本体的变化，不断更新数字空间的模型，预测和评估系统行为。

数字孪生模型被定义为三维模型<sup>[1]</sup>，包括：物理实体、数字实体及二者之间的连接。其中，物理实体包括物理环境和物理本体，数字实体包括数字本体和数字环境，二者之间数据双向传递，物理实体向数字实体中传递传感器等客观的数据（data），数字实体利用数据对数字本体和数字环境建模仿真后，向物理实体传递具备描述、诊断、预测和优化等特征的信息（information），它们能实时指导物理实体的行为，并为系统运行提供辅助决策。数字孪生技术的应用得益于多领域建模综合技术和新型信息技术的发展。

#### 多领域建模综合技术的发展

多领域建模综合技术得益于基础理论和数值仿真技术的发展，气、固、热、电磁、控制等多领域建模

综合技术的发展，使得对物理实体的机理认识更加透彻，具备解决多领域子模型之间的数据高效交换能力，因此能刻画出跨时间、多尺度、高精度、高适应性的物理机理模型。

#### 新型信息技术的发展

当前应用于发动机运行维护的算法包括：模型驱动的算法、数据驱动的算法和混合算法，其发展经历了从基于模型的故障诊断预测，到基于专家系统的推理预测，再到数据驱动的智能诊断预测，现在发展为模型驱动与数据驱动的融合诊断预测。重点解决的问题包括：有限传感器下的故障诊断与隔离，关键健康参数的估计及恢复，海量数据的趋势分析，发动机自适应模型的精准建模，综合利用设计、维修、试验、飞行数据的推理等。

大数据应用技术的发展促进了数据共享和快速分析。其发展经历了从基于数据统计的描述性分析，到利用历史数据建立分析模型的规定性分析，再到使用大数据挖掘实现对未来状态的预测性分析。大数据技术的应用大大提高了数据存储和分析的能力，促进了复杂系统全

生命周期的数据统一存储和共享，为不同子系统提供统一的数据视角，使数据在不同子系统之间快速传递、交互、融合，实现了以功能应用为导向的跨系统数据挖掘分析。

传感器和网络技术的发展提升了复杂系统的感知能力。能承受极限温度、压力等环境条件的新型传感技术的发展，为发动机更多核心部件精细化测量提供手段；具备故障自诊断、故障处理能力的控制系统传感器提高了系统应对复杂环境和精确控制的能力。网络技术的发展，提高了复杂系统数据实时交换的速度，促进了信息的及时分享和传递。

数字孪生技术综合多领域建模综合技术和新型信息技术，构建出可精确模拟物理实体的数字孪生体，可实现对复杂系统内涵的深入挖掘与拓展，实时预测系统行为，使研究由试验分析、解析分析、仿真分析过渡至模型驱动和数据驱动的综合分析。

### 数字孪生技术在航空发动机运行维护中具有重要意义

当前航空发动机预测与健康管

术是解决航空发动机复杂装备系统运行维护的主要手段，其技术主要包含在线状态监测、故障诊断、性能退化和寿命预测、健康管理等，是由航空发动机在已知理想运行状态下的监测数据和模型所驱动。由于航空发动机运行环境多变，其性能与设计、制造等过程紧密相关，随着控制系统和传感器技术的发展，监测数据量急剧增长，数据呈现出高速、多源、异构等典型特征，当前的技术难以满足航空发动机在动态多变环境下的状态实时评估、预测的高精度需求。多领域建模综合技术和智能传感、大数据、人工智能等新型信息技术的发展，使现代支撑技术朝着计算精准、分析智能、功能完备等方向发展，使高精度地模拟航空发动机复杂系统的行为特征成为可能，当前的技术体系逐渐演变为数字孪生技术体系。

数字孪生技术在数字空间构建了一个基于高精度物理模型、历史数据、传感器数据的数字实体模型，该模型能反应系统的物理特性和应对环境的多变特性，可实现发动机的性能评估、故障诊断、寿命预测等功能，同时可基于全生命周期多维反馈数据源，在行为状态空间迅速学习和自主模拟，预测对安全事件的响应，并通过物理实体与数字实体的交互数据对比，及时发现问题，激活自修复机制，减轻损伤和退化，有效避免具有致命损伤的系统行为。

## 航空发动机运维数字孪生模型包含的要素

从全生命周期角度看，数字孪生技术可应用于航空发动机的设计研发、生产制造、运行维护等各阶段。在

设计研发阶段，数字孪生技术可将历史发动机的全生命周期数据，如设计周期、研发成本、主要性能指标、运行维修等重要数据，反馈至研发人员，研发人员依据几何模型、性能模型、需求指标、历史产品数据构建数字孪生体，并不断迭代优化实现设计目标；在生产制造阶段，数字孪生技术可将生产系统和发动机零部件数字化，形成数字生产线和数字本体，实时采集制造和装配过程信息，实现对发动机制造装配过程的实时监控、修正；在运行维护阶段，数字孪生技术可对发动机运行环境和发动机实体建模，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。

数字孪生技术在发动机运行维护中的应用落地场景如图1所示，以应用为导向，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。在航空发动机全生命周期不同的阶段，数字

孪生模型解决问题的侧重点不同，因此模型包含的内容也有所差异。依据数字孪生模型的定义，航空发动机运维数字孪生模型包含了物理空间中的实际运行环境和发动机实体、数字空间中的数字环境和数字实体、物理空间和数字空间的数据/信息双向交换。

物理空间中有实际运行环境和发动机实体，实际运行环境是指飞行包线和飞机运行状态，发动机实体是包含控制系统的物理发动机本体。在物理空间中，物理发动机本体和运行环境相互影响，运行环境直接影响发动机的进气条件和控制状态，发动机输出的推力及其性能变化影响飞机运行状态。

数字空间中的数字环境和数字实体，是运行环境和发动机实体的数字孪生体，融合模型驱动和数据驱动方法建立的环境模型和发动机模型，构成了多维度、跨时间、高精度的可表征物理空间实体行为的孪生体。

物理空间向数字空间传递的数据包括实时数据和离线数据，其中，

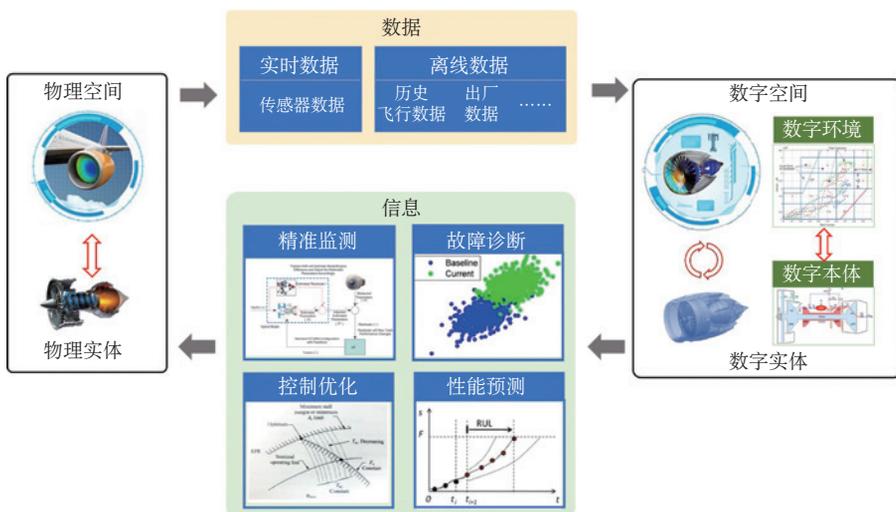


图1 数字孪生技术在航空发动机运行维护中的应用落地场景图

实时数据是指传感器数据，离线数据是指历史飞行数据、出厂数据、维修/故障数据等，这些数据支撑了数字空间中数字环境和数字实体的构建和更新。数字空间向物理空间传递的信息是包含行为指导意义的数据，是数字孪生体的行为特征，可对发动机行为精准监测、故障诊断、性能预测和控制优化。

在航空发动机运维数字孪生模型中，运维数字孪生体是物理空间和数字空间的双向精准映射的基础。基于发动机原理构建的多领域物理基准模型，并融合不同的数据建立精细化模型形成运维数字孪生体，可针对航空发动机运维中的不同场景提供预测和指导。

## 航空发动机运维数字孪生体的构建

航空发动机运维数字孪生体的构建采用模型驱动和数据驱动融合的方法。首先，基于发动机原理采用模型驱动的方法构建了多维度、跨时间的数字孪生体初始模型；其次，基于初始模型并融合不同的数据，如实时传感器数据、故障数据、历史飞行数据等，实时修正初始模型，使其具备精准监测、故障诊断、性能预测和控制优化的行为特征，进而形成运维数字孪生体。

### 模型驱动的数字孪生体初始模型构建

在数字空间中，利用模型驱动的方法基于发动机原理构建的同一物理实体多尺度、跨时间的初始孪生模型，包括能反映内部流动机理的物理模型、利用部件法建立能反应容腔效应的发动机实时性能模型、专用于控制系统设计和优化的局部

线性化模型等，3种模型是同一物理发动机在不同时间尺度和精度上的表示，如图2所示。3种模型之间是递进关系，具体表现为：在确定几何模型后，利用多领域综合建模技术得到高精度的物理模型，但高精度模型的时间迭代周期很长，无法快速预测性能；因此，可基于高精度的物理模型，利用维度缩放技术获取精确的部件特性，通过部件法建立低维度性能模型，该模型在时间尺度上具有优势，能与发动机实时仿真，可应用于故障诊断和性能预测；进一步，可基于发动机低维度性能模型联合飞行状态在具体工作点处线性化建立局部线性模型，应用于控制优化。

### 模型驱动与数据驱动相融合的动态演化数字孪生体构建

以数字孪生体初始模型为基础，结合物理空间向数字空间传递的数据，构建动态演化的运维数字孪生体。初始模型与物理空间中传递的不同数据相结合，使其具备所要求的行为特征，形成航空发动机运维

数字孪生体，如图3所示。

将实时传感器数据与性能模型结合，随运行环境变化和物理发动机性能的衰减，构建出自适应模型，可精准监测发动机的部件和整机性能；将历史维修数据中的故障模式注入三维物理模型和性能模型，构建出故障模型，可应用于故障诊断和预测；将历史飞行数据与性能模型结合并融合数据驱动的方法，构建出性能预测模型，预测整机性能和剩余寿命；将局部线性化模型与飞机运行状态环境模型融合并构建控制优化模型，可实现发动机控制性能寻优，使发动机在飞行过程中发挥更好的性能。这些模型联合刻画出一个具有多种行为特征的数字发动机，并向物理空间传递在特定场景下所呈现的行为信息，实现对物理发动机的精准监测、故障诊断、性能预测和控制优化。

精准监测特征是解决发动机衰减后，模型无法实时准确估计整机性能参数的问题。发动机出厂时，数字空间中的发动机性能模型是额

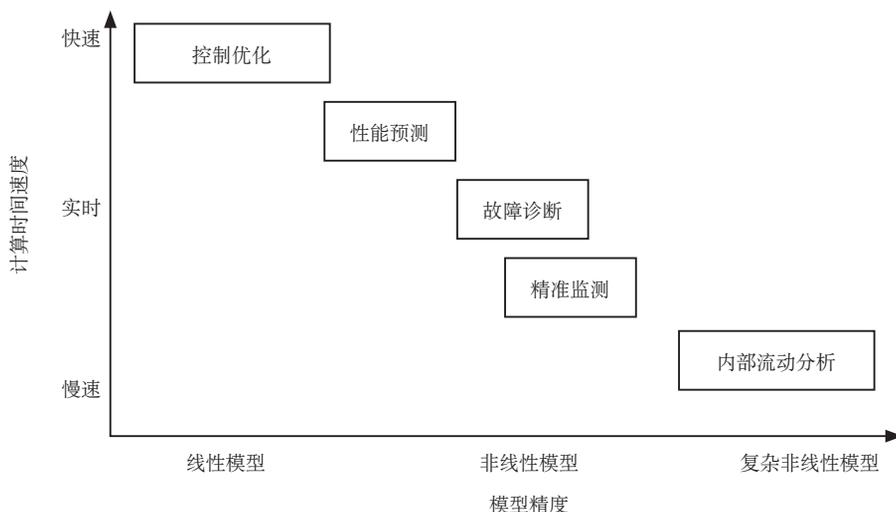


图2 不同模型在计算精度速度上的比较

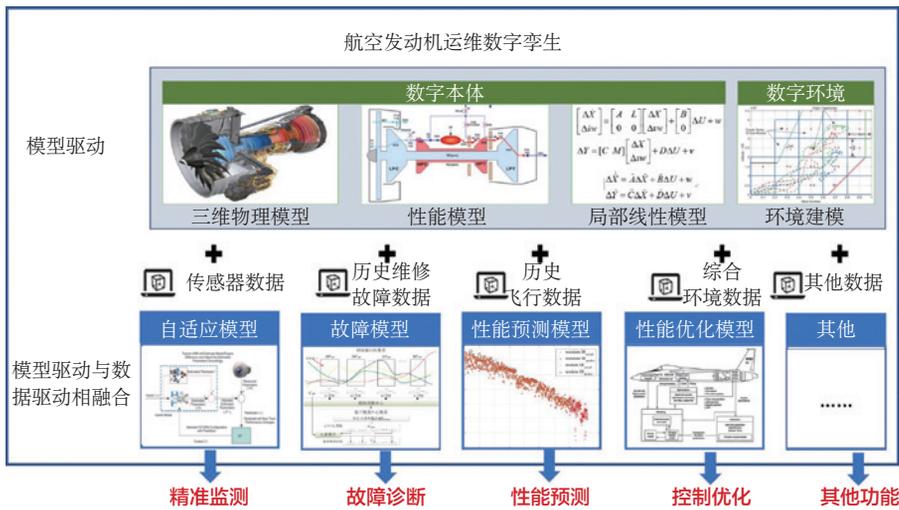


图3 航空发动机运维数字孪生

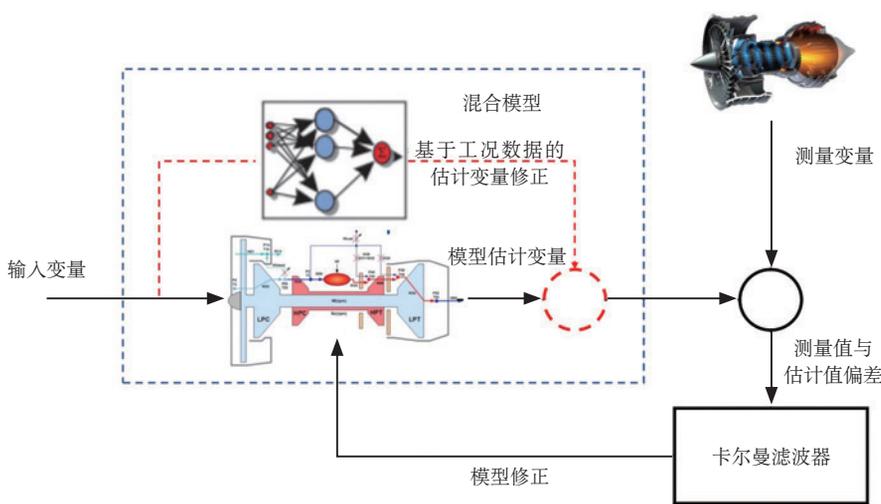


图4 精准监测功能

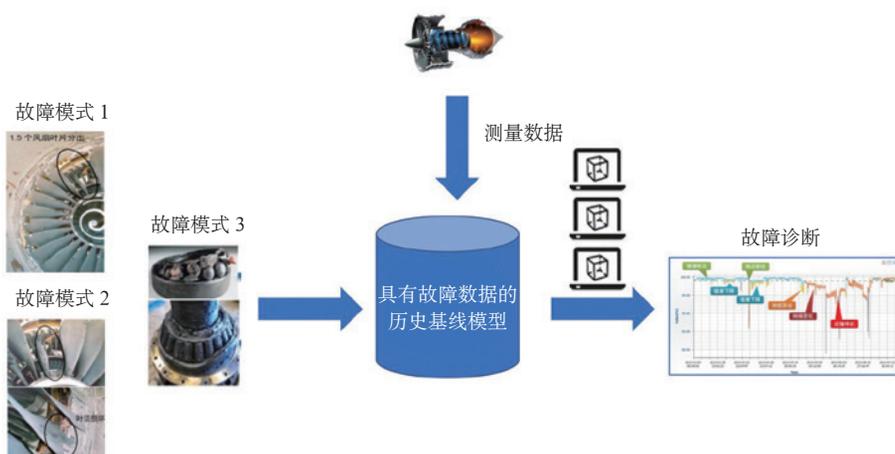


图5 故障诊断功能

定性能模型，长时间运行后，由于部件磨损、叶片变形、外来物损伤、叶尖间隙超差等原因，性能发生退化，数字空间中发动机性能模型的输出值与物理空间中发动机真实传感器测量值出现偏差，整机性能参数（如推力、耗油率等）无法精确估计，为实现精准监测的目标，可利用传感器偏差数据对基准模型中的性能模型实时修正，建立精准监测整机性能参数的自适应模型如图4所示。具体实现方法如下：通过物理空间真实发动机的传感器测量值与数字空间发动机性能模型的输出值偏差，利用卡尔曼滤波器估计性能模型的变化程度，并在包线范围内利用神经网络算法对基准模型修正，准确估计和修正部件特性退化，使模型输出与真实发动机输出保持一致。

故障诊断将同批次发动机的维修、故障数据记录分析形成故障模式，注入到初始模型，在实际运行中不断与发动机测量数据比较，提取相似的故障模式预测故障。数字空间中的发动机性能模型与故障数据融合可生成故障诊断模型以实现发动机故障预测，发动机故障类型众多，包括气路、振动、滑油等，监控系统可对发动机的主要工作参数，例如转速、压比、排气温度、燃油流量、滑油量、滑油压差等，进行监控。超过阈值时，对系统报警。此外，将历史同批次发动机的故障模式融入模型中，系统测量参数超过阈值报警的同时，将测量参数与故障模式匹配，进行故障诊断，具体如图5所示。

性能预测特征可记录同批次发动机的运行历史数据，融合基准模

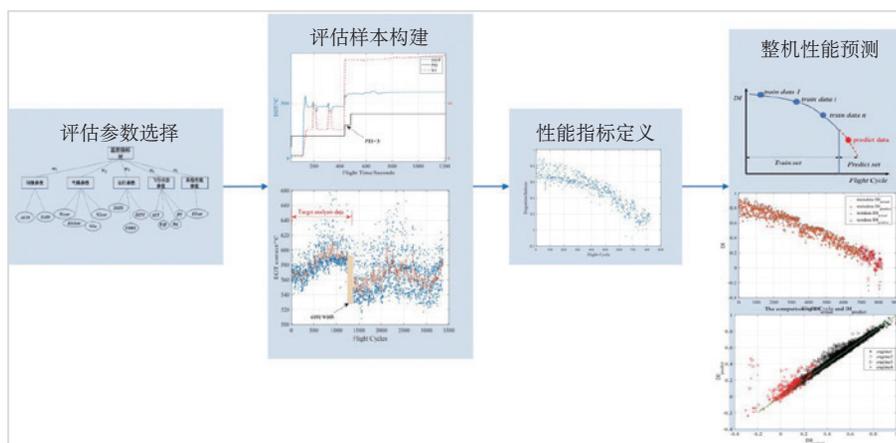


图6 性能预测功能

型进行性能预测。发动机长时间运行后性能下降，为准确评估性能下降的程度，需利用实时传感器数据和历史飞行数据对发动机进行性能预测。根据物理空间中同批次发动机多次飞行数据，建立性能预测模型的具体实现途径如图6所示。性能预测模型的构建包括评估参数选择、样本构建、指标定义、性能预测等4个步骤。其中，评估参数选择是从飞行数据中选出对发动机性能衰退有影响的测量参数，主要包括机场条件、气路参数、发动机运行参数、其他参数等多个因素；样本构建是在每个飞行架次中选取特定状态评估参数的测量数据形成评估样本；指标定义是指通过观测变量定量衡量发动机的衰退程度；性能预测是采用数据驱动的方法结合传感器测量的实时数据预测发动机性能。性能预测模型解决了物理空间中真实发动机性能度量 and 预测问题，同时为视情维修提供手段。

控制优化特征解决了飞机和发动机综合控制过程中发动机控制优化的问题。发动机和飞机设计初期作为单独系统设计，发动机在有限

的约束指标下完成特定目标，并未考虑不同飞行环境条件下的控制优化，即发动机工作在最差工作条件下仍能达到目标，该设计原则导致发动机未发挥最佳性能，在实际运行过程中控制系统尚有较大优化空间。将发动机飞行环境与基准模型相融合，构建控制优化模型，实现不同飞行条件下，自适应调整控制系统整体优化发动机性能。根据环境因素平衡任务要求，以牺牲发动机部分喘振裕度为代价，在爬升阶段提高推力、在巡航阶段降低耗油率以及在提供满足飞机推力的情况下降低涡轮前温度，提高发动机性能、可操作性和可靠性，延长发动机寿命，降低发动机使用维护成本，实现途径如图7所示。

融合模型驱动和数字驱动的方法构建航空发动机运维数字孪生体：首先利用模型驱动的方法构建了多维度、跨时间的数字孪生体初始模型；然后基于初始模型并融合实时数据和离线数据进一步构建了具备精准监测、故障诊断、性能预测和控制优化等行为特征的航空发动机运维数字孪生体。该数字孪生

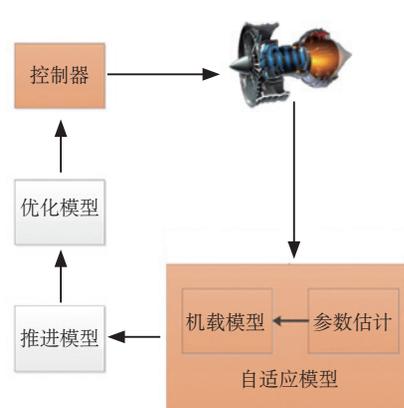


图7 控制优化功能

体具有开放的特征，随着对物理发动机认识的深入，可刻画更多的行为特征，通过模型扩展的方式，使数字孪生体的行为特征更加丰富。

## 结束语

本文简要论述了数字孪生技术的发展和主要驱动技术，阐述了在航空发动机运行维护中的重要意义；基于数字孪生模型的三维模型定义，详细描述了航空发动机运维数字孪生模型的包含要素；融合模型驱动和数据驱动的方法，在运维阶段构建了多维度、多尺度、跨时间的数字发动机模型，并以此形成航空发动机运维数字孪生体。

**航空动力**

(刘魁, 中国航发研究院, 高级工程师, 主要从事航空发动机仿真及信息化技术研究)

## 参考文献

- [1] Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems[M]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer-Verlag, 2017.